

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

Talvised süsihappegaasi vood Soontaga metsaökosüsteemi näitel

Margarita Oja

Juhendaja: PhD Kaido Soosaar

Kaasjuhendaja: MSc Birgit Viru

Tartu 2020

Annotatsioon

Talvised süsihappegaasi vood Soontaga metsaökosüsteemi näitel

Hemiboreaalsed metsad kui süsiniku sidujad tasakaalustavad globaalset süsinikubilanssi, kuid nendes metsades on tehtud vähe talvist aega hõlmavaid süsihappegaasi (CO₂) voo uurimusi. Töö eesmärk oli hinnata talvist ehk vegetatsioonivälist (ööpäevane keskmine õhutemperatuur alla +5 °C) CO₂-voogu metsaökosüsteemis. Proovid koguti 2013–2019 aastatel kahenädalase intervalliga suletud staatilise pimekambrimeetodiga, hemiboreaalse okasmetsa aluspinnalt, Soontaga uurimisjaamast. Tulemused näitasid, et talvine CO₂-voog moodustab 24% aastasest voost. Talvised CO₂-vood varieerusid vahemikus 12,1–261,1 mg m⁻² h⁻¹, väikseimad vood olid jaanuaris. Talvised CO₂-vood statistiliselt oluliselt ei suurenenud, küll aga oli trend ajas tõusev. Õhutemperatuuri ja CO₂-voo vahel oli statistiliselt oluline ja tugev seos. Tulemustest saab järeldada, et talvine CO₂-voog moodustab olulise osa aastasest voost ja seda mõjutavad õhutemperatuur ja lumikatte paksus.

Märksõnad: CO₂-voog, lumikate, mets, süsihappegaas, talv, õhutemperatuur, ökosüsteem

CERCS kood: P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Wintertime carbon dioxide fluxes on the example of Soontaga forest ecosystem

Hemiboreal forest has the ability to influence the global carbon balance, but not enough research has been conducted on carbon dioxide (CO₂) fluxes during winter. This research examined the role of wintertime (period outside the growing season when the daily average air temperature was below +5 °C) CO₂ fluxes through forest floor respiration. Field studies were conducted in Soontaga research station located in a hemiboreal coniferous forest between the years 2013–2019 within two weeks interval using a static closed chamber method. The research findings showed that wintertime CO₂ fluxes formed approximately 24% of the annual budget. Throughout the study period wintertime CO₂ flux varied from 12.1 to 261.1 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, lowest fluxes occurred in January. Within the seven-year-period, wintertime CO₂ fluxes have shown no significant rise. A significantly strong correlation between CO₂ flux and the air temperature was found. The study concludes that wintertime CO₂ fluxes contribute significantly to the annual CO₂ budget and are influenced by air temperature and snow depth.

Keywords: air temperature, carbon dioxide, CO₂ fluxes, ecosystem, forest, snow cover, winter

CERCS code: P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Teoreetiline ülevaade	6
1.1 Ökosüsteemi CO ₂ -vood	7
1.2 Metsade roll süsinikuringes	9
1.3 Talvised CO ₂ -vood	11
1.4 Meetodid CO ₂ -voogude mõõtmisel	13
2. Metoodika	16
2.1 Uurimisala kirjeldus	16
2.2 CO ₂ -voo mõõtmine	16
2.3 Andmetöötlus	18
3. Tulemused	20
3.1 Talvise CO ₂ -voo osakaal aastasest voost	20
3.2 Õhutemperatuuri ja CO ₂ -voo vaheline seos	22
3.3 Lumikatte ja CO ₂ -voo vaheline seos	24
4. Arutelu	26
Kokkuvõte	30
Summary	31
Tänuavaldused	33
Kasutatud kirjandus	34
Lisa 1.	44
Lisa 2.	46
Lisa 3.	47
Lisa 4.	48

Sissejuhatus

Süsihappegaasi (CO₂) kontsentratsioon atmosfääris on võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga oluliselt suurenenud, mille tagajärjel on tõusnud ka globaalne keskmine õhutemperatuur (Global climate report..., 2020). See on omakorda viinud globaalse süsinikubilansi tasakaalust välja ja süsinikuvaru ei ole enam voogudega tasakaalus. Metsaökosüsteemidel on võime tasakaalustada süsinikubilanssi, sest sinna on talletunud suured süsinikuvarud nii biomassis kui ka metsamullas (FAO, 2010). Palju on uuritud CO₂-vooge boreaalsetes ja parasvöötme metsades, kuid nende üleminekuvööndis – hemiboreaalsetes metsades – on vastavad uuringud olnud ebapiisavad (Krasnova *et al.*, 2019a).

Hooajaliselt lumega kaetud ökosüsteemid on muutuva kliima suhtes eriti haavatavad, kuna juba vähene kliima kõikumine võib põhjustada suuri muutusi lumikatte paksuses ning mullatemperatuuris, külmumises ja niiskuses (Stielstra *et al.*, 2015). Lumikatte on põhjapoolsetel laiuskraadidel tähtis, sest see isoleerib ja kaitseb alustaimestikku tugeva külmumise eest (Haei *et al.*, 2013). Samas on aga õhutemperatuur viimase 30 aasta jooksul tõusnud kõige rohkem talvel, mistõttu lumikatte kestus ja paksus on viimasel ajal vähenenud. Eestis on viimase 60 aastaga jäänud lumikattega päevi märgatavalt vähemaks (Viru & Jaagus, 2020).

Eesti metsades on küll uuritud erinevaid süsinikuringe komponente, kuid enamikest puuliikidest ja kasvukohatüüpidest ei ole terviklikku käsitlust, et koostada regionaalseid süsinikumudeleid (Raudsaar *et al.*, 2018). Ka Eesti metsanduse arengukava 2030 alusuuringu kohaselt on vajalik jätkata süsiniku uuringuid eri metsatüüpides. Sellest hoolimata ei ole suurt rõhku pööratud talvistele CO₂-voogudele, mis oli ajendiks selle töö tegemisel. Siinses uurimuses on talvist aega käsitletud kui vegetatsioonivälist aega, kui ööpäevane keskmine õhutemperatuur on püsivalt alla 5 °C.

Töö eesmärk on hinnata talvist metsa aluspinna ja atmosfääri vahelist CO₂-voogu hemiboreaaalses metsaökosüsteemis ja välja selgitada, kuidas seda mõjutavad õhutemperatuur ja lumikatte paksus. Eesmärgi saavutamiseks otsib autor vastuseid järgmistele küsimustele:

1. Kui suur osakaal (%) on talvisel CO₂-vool aastasest metsaökosüsteemi CO₂-voost?
2. Kui suurel määral mõjutavad õhutemperatuur ja lumikatte paksus CO₂-vooge talvises metsaökosüsteemis?

Püstitatud on kaks hüpoteesi.

1. Kõrgema talvise õhutemperatuuri tagajärjel suureneb ka talvine metsa aluspinna ja atmosfääri vaheline CO₂-voog.

2. Ajas (seitsmeaastane mõõteperiood) talvine CO₂-voog suureneb.

Töös on antud ülevaade varasematest uurimustest, mis käsitlevad süsiniku netobilanssi, metsa aluspinna hingamist ja metsade rolli süsinikuringes. Autor annab ka ülevaate varasematest teadustöödest, kus on uuritud CO₂-vooge ja neid mõjutavaid tegureid. Uurimuses kasutatud andmed on kogutud pimekambri meetodil, mis on üks levinumaid meetodeid metsa aluspinna ja atmosfääri vahelise CO₂-voogude mõõtmisel. Proovid on kogutud 2013–2019 aastatel Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaamast (58°01'24"N, 26°04'15"E).

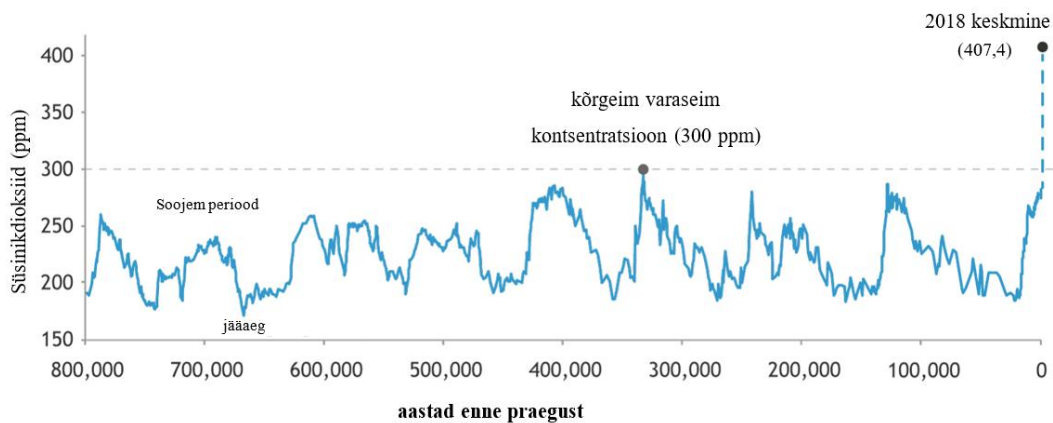
1. Teoreetiline ülevaade

Süsinikuringe koos vee- ja lämmastikuringega teeb võimalikuks biosfääri olemasolu ja elu Maal. Süsinikuühendite varude ja nendevaheliste voogude tasakaalu iseloomustab globaalne süsinikubilanss. Peamised süsinikuvarud on talletatud biosfääri puiduna, pedosfääri mulla orgaanilise aienana, atmosfääri gaasilisse olekusse CO₂ molekulidena, hüdroosfääri lahustunud atmosfäärsete CO₂ molekulidena ja litosfääri fossiilkütustena (Malhi *et al.*, 2002).

Süsihappegaasi vabastatakse atmosfääri nii looduslike kui ka antropogeensete protsesside tagajärjel. Looduslikes ökosüsteemides on süsinikuvarud ja vood tasakaalus atmosfääri, ookeani ja maapinna vahel (Friedlingstein *et al.*, 2019). Seevastu inimtegevuslikes ökosüsteemides viivad süsinikubilansi tasakaalust välja fossiilkütuste põletamine ja maakasutuse muutused, nagu metsaraie, intensiivne põllumajandus, loomakasvatus ja turbaalade kuivendamine (IPCC, 2014). Fossiilkütuse – nafta, maagaasi, kivi-, ja pruunsöe, põlevkivi ja turba – põletamisel eraldub atmosfääri süsinikku, mis on ringlusest väljas olnud miljoneid aastaid (Berner, 2003).

Ökosüsteemi ja atmosfääri vaheliste kasvuhoonegaaside (KHG), eriti CO₂ koguse määramine on aastakümneid olnud keskkonnauuringute fookuses (Eesti metsanduse arengukava..., 2018). Näiteks on Hawaii Mauna Loa observatooriumis 1958. aastast järjepidevalt mõõdetud ja jälgitud CO₂ sisaldust ja selle kontsentratsiooni muutusi atmosfääris. Süsihappegaasi kontsentratsioon atmosfääris on võrreldes 1880. aastate ehk tööstusrevolutsioonieelse ajaga suurenenud 413 miljondikuni ehk ligi 40% (Bailey *et al.*, 2020). 2018. aastal oli globaalne keskmine CO₂ sisaldus atmosfääris $407,4 \pm 0,1$ miljondikku, mis on viimase 800 000 aasta suurim (Lindsey, 2020; joonis 1). Varasema aja CO₂ kontsentratsioon on tuletatud Antarktikas jää tuumadesse kinni jäänud õhu kaudu (Lüthi *et al.*, 2008).

CO₂ ja teised KHG neelavad soojuskiirgust, mis tähendab, et nad lasevad Päikeselt Maale tuleva kiirguse läbi, kuid takistavad soojuse tagasipeegeldumist, põhjustades kasvuhooneefekti. Selle tagajärjel tõuseb temperatuur Maa atmosfääri alumistes kihtides. 2019. aasta seisuga oli globaalne keskmine maa- ja ookeanipinna lähedane õhutemperatuur $0,95 \pm 0,15$ °C kõrgem 20. sajandi keskmisest $13,9$ °C (Global climate report..., 2020). Valitsuste vahelise kliimamuutuste paneeli (IPCC) aruandes tuuakse välja, et kõrgem õhutemperatuur on kaasa toonud arktikajää ja igikeltsa sulamise, millega kaasneb merevee taseme tõus. Globaalsel tasemel on saenenud ekstreemsed ilmastikunähtused, nagu liigniiskus, äärmuslikud sademed, kuumalained ja põuad. (IPCC, 2018)



Joonis 1. CO₂ kontsentratsiooni muutused atmosfääris geoloogilisel ajaskaalal (Lindsey, 2020).

Eestis on aasta keskmise õhutemperatuuri tõus olnud veidi kiirem kui möödunud sajandi keskpaiga maailma keskmine, olles tõusnud 0,03 °C võrra aastas (Luhamaa *et al.*, 2014). Eestis toob pikenev vegetatsiooniperiood kaasa puude kiirema juurdekasvu. See aga vähendab puidu tihedust, mis suurendab tormikahjustuste ohtu metsas. Väiksema tihedusega puudel on madalam süsiniku talletamise efektiivsus ja puidu kütteväärtus. (Sepp *et al.*, 2018) Vegetatsiooniperioodi pikenedes nihkub kevade algus varasemaks ja taimed hakkavad varem õitsema, mille mõju ulatub ka talvisele mullahingamisele (Peng *et al.*, 2010). Samuti põhjustavad kliimamuutused olulisi pikaajalisi muutusi Eesti metsasektoris. Metsade koosseis ja ökoloogiline seisund muutuvad ning ekstreemsed ilmastikuolud võivad tekitada vältimatut kahju metsadele ja nende ökoloogilistele koosseisudele (Tullus *et al.*, 2015).

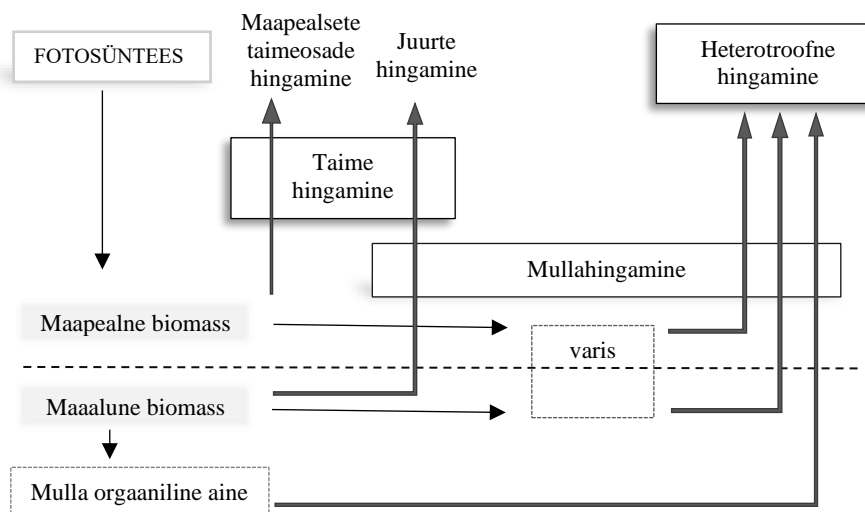
1.1 Ökosüsteemi CO₂-vood

Süsinikuvooge iseloomustab süsiniku ja selle ühendite liikumine eri keskkondade vahel. Kogu ökosüsteemi hingamine põhineb autotroofselt (R_a) ja heterotroofselt (R_h) hingamisel (Luyssaert *et al.*, 2007; joonis 2). Heterotroofne hingamine on loomade, mulla mikroorganismide ja makrofauna hingamisel vabanenud CO₂. Heterotroofide alla kuuluvad nii maa peal kui ka maa all elavad organismid, kes elavad mullas, varises ja lagunenenud orgaanilises aines. (Kirschbaum *et al.*, 2001) Autotroofselt hingamisel vabaneb taime sisemise ainevahetuse kaudu fotosünteesi käigus fikseeritud süsinik. Autotroofid on peamiselt rohelised taimed, kes seovad fotosünteesi käigus CO₂-te. Fotosünteesi valgusest sõltuvas etapis vajab taime päikeseenergiat, vett, õhus olevaid CO₂ molekule ja klorofüllit, et toota ATP ja NADPH molekule. Pimestaadiumis kasutab taime CO₂ ja ATP salvestatud energiat, et toota glükoosi ja muid suhkruid. (Waring & Running, 2007)

Taime hingamine toimub elusate taimede maapealsete osadega (lehed, võrsed, oksad ja tüvi) ning maa all elusate juurtega (Kuzyakov, 2006).

Mullahingamine (R_s) on CO_2 eraldumine mullast orgaanilise aine muundumisel ja mullaelustiku tegevusel (Kirschbaum *et al.*, 2001). Peamised tegurid, mis mullahingamist mõjutavad on õhu- ja mullatemperatuur ning mulla niiskus (Raich & Schlesinger, 1992; Peterjohn *et al.*, 1993; Verburg *et al.*, 2005). Mullahingamise moodustab maa-alune R_a ja R_h hingamine ning see iseloomustab mulla bioloogilist aktiivsust (Luyssaert *et al.*, 2007). Mulla mikroobne aktiivsus on esmatähtis orgaanilise aine mineralisatsioonil, mis tagab toitained ka juure hingamiseks. Mullahingamine arvestab elus taimejuurte ja mikroorganismide hingamist, metsa aluspinna lagunenu osa ning surnud juuri ja mulla orgaanilist ainet (Sever *et al.*, 2019).

Kogu mulla CO_2 väljavoogu (*soil CO_2 efflux*) on käsitletud samuti kui mullahingamist, samas mõned teadlased käsitlevad mullahingamisena ainult seda CO_2 väljavoogu, mis tuleb heterotroofsest hingamisest mullas, et eristada seda juurtest tulenevast taime hingamisest (Kirschbaum *et al.*, 2001). Siinses töös on kambritega mõõdetud metsa aluspinna hingamist, mis hõlmab nii mullahingamist (kambrid paigutatud rõngale, mis mullas 10 cm sügavusel) kui ka taimede maapealsete osade hingamist (kambrate sisse jäi aluskatte taimeistik).



Joonis 2. Põhilised süsinikuvood ja nendega seotud komponendid esitatud skemaatilisel kujul (Kirschbaum *et al.*, 2001 järgi).

Ökosüsteemi primaarproduktioon GPP (*Gross Primary Production*) on süsiniku kogutoodang, mis on fotosünteesi käigus fikseeritud. Näiteks võib metsaökosüsteem aastas fotosünteesi protsessi käigus fikseerida $20 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Kogu globaalset aastast GPP hinnatakse ligikaudu 120 GtC a^{-1} . (Kirschbaum *et al.*, 2001) Netoprimaarproduktioon NPP (*Net Primary*

Production) on süsiniku kogutoodang, kus ei ole arvestatud autotroofset hingamist, et saada teada palju taim süsinikku endasse seob (Luyssaert *et al.*, 2007). Seda saab leida valemiga:

$$NPP = GPP - R_a$$

NPP on üks peamisi metsa ökosüsteemi süsinikuvoogudest, mis sõltub peamiselt puuliigist, puistu vanusest ja kliimast (Sever *et al.*, 2019) ning moodustab hinnanguliselt poole GPP-st. Läbi aastate peab NPP olema positiivne, vastasel juhul kaotab süsteem oma süsinikuvarud ja lakkab eksisteerimast (Kirschbaum *et al.*, 2001).

Ökosüsteemi CO₂ netobilanss (NEE – *Net Ecosystem Exchange*) on süsiniku kogus, mis jääb alles kui netoprimaarproduksioonist on maha arvestatud heterotroofne hingamine. Seda saab leida valemiga:

$$NEE = NPP - R_h$$

NEE iseloomustab ökosüsteemi hingamise ja GPP vahelist tasakaalu (Zhang *et al.*, 2017), millega on võimalik välja selgitada, kas vaadeldav ökosüsteem on CO₂ allikas või talletaja. Süsiniku talletaja (*sink*) on protsess või tegevus, mis eemaldab KHG ja aerosooli atmosfäärist, ehk seob rohkem CO₂ kui eraldab. Süsiniku allikas (*source*) on protsess või tegevus, mis vabastab KHG või aerosooli atmosfääri ehk eraldab CO₂ rohkem kui seob. (United Nations, 1992) Positiivse NEE väärtusega vabaneb ökosüsteemist rohkem süsinikku atmosfääri, seevastu negatiivne NEE väärtus näitab ökosüsteemi süsiniku sidumist.

1.2 Metsade roll süsinikuringes

Mets on maastiku osa ja taimekooslus, kus puud üksteist mõjutavad ning on vastastikusel seoses kasvukoha ja keskkonnateguritega, nagu mullastik, õhk ja taimestik. Puuvõrade liitumisel tekib nende alla metsale omane keskkond, kus on muutuvad valgus-, soojus- ja niiskustingimused. Mets moodustab omaette ökosüsteemi. Ökosüsteem on funktsionaalne süsteem, kus toitumissuhete kaudu seotud organismid koos keskkonnatingimustega moodustavad isereguleeriva areneva terviku (Rutledge *et al.*, 2011). Maailma metsade süsinikuvaru on ligikaudu 650 miljardit tonni süsinikku, millest 44% on biomassis, 11% surnud puidus ja 45% mullas (FAO, 2010). 2015. aasta seisuga moodustavad metsad 30,6% kogu maailma maismaapinnast (FAO, 2018), mistõttu on vajalik neid säilitada ja kaitsta.

Eesti metsad kuuluvad hemiboreaalsesse ehk segametsade vööndisse, kus kooseksisteerivad okas- ja laiulehelised lehtpuud, olles üleminekuala parasvöötme ja boreaalse metsavööndi vahel (Ahti *et al.*, 1968). Hemiboreaalsed metsad on rikkama taimestiku ja suurema bioloogilise

aktiivsusega kui boreaalsed metsad (Bradshaw & Edenius, 1998). Samuti varieerub nende mikrokliima rohkem kui boreaalsetes metsades (Noe *et al.*, 2011). Eestis kehtiva metsaseaduse järgi on mets ökosüsteem, mis koosneb metsamaast, sellel kasvavast taimestikust ja seal elunevast loomastikust (Metsaseadus, 2006). Metsamaa on „maatükk pindalaga vähemalt 0,1 hektarit, millel kasvavad puittaimed kõrgusega vähemalt 1,3 meetrit ja puuvõrade liitusega vähemalt 30 protsenti“ (Metsaseadus, 2006).

Kogu Eesti pindalast, ilma Peipsi, Pihkva, Lämmi-, Võrtsjärve, Narva jõe ja Kulje lahe pindalata, moodustab 2018. aasta seisuga metsamaa 53,6%, millest 49,4% on metsaga maa ning 4,2% metsata maa. Eesti metsades on enamuspuuliigina kõige rohkem mände, moodustades 33% kogu metsamaa pindalast. (Raudsaar *et al.*, 2018) Okaspuud on üldiselt kõrgema süsiniku sisaldusega kui lehtpuud, sest nad sisaldavad rohkem ligniini (Lamlom & Savidge, 2003). Samas on viimase 20 aastaga (1998–2018) nii era- kui riigimetsades okaspuude osakaal vähenenud, lehtpuude osakaal aga suurenenud (Raudsaar *et al.*, 2018).

2017. aastal suurenes Eesti metsades süsinikuvaru 1,93 miljoni tonni CO₂ ekvivalendi võrra. See tähendab, et puistu biomassi juurdekasv ületas raietest, surnud puidu kõdunemisest, mullahingamisest, turvasmuldade kuivendamisest ja põlengutest tulenevaid kasvuhoonegaaside heitmeid. (Raudsaar *et al.*, 2018) Eesti metsaökosüsteem seob aastas ligi 5,5 miljonit tonni CO₂-te (1990–2012 keskmiste väärtuste põhjal). Enamik sellest, ligikaudu 5 miljonit tonni talletub kasvavasse puitu, 0,4 miljonit tonni mulda ning väike osa süsinikku akumulatsiooniperioodil varises ja surnud puidus. (Tullus *et al.*, 2015)

Eestis on süsinikuvooge ja varusid uuritud mitmetes metsatüüpides (lisa 4). Lehtpuupuistes on süsiniku-uuringuid tehtud arukaasikutes (Varik *et al.*, 2013; 2014; 2015) ja hall-lepikutes (Uri *et al.*, 2014; 2017). Okasmetsades on tehtud süsinikuga seotud uurimusi põhiliselt männikutes aga ka kuusikutes (Soosaar *et al.*, 2014; Uri *et al.*, 2019; Nokkur, 2019; Kriiska *et al.*, 2019). Krasnova *et al.* (2019b) võrdlesid sega- ja okasmetsa süsinikubilanssi, kus selgus, et vegetatsiooniperioodil mullahingamine eri metsatüüpides oluliselt ei erinenud.

Noe *et al.* (2011) uuring oli Eestis üks esimesi laiaulatuslikemaid metsaökosüsteemi süsinikuvooge käsitlev uuring. Samas on Eesti metsaökosüsteemides uuritud ka teisi süsiniku komponente, nagu maa-alust biomassi ja juurte süsinikuringet (Ostonen *et al.*, 2011; 2013; 2017) ning õhuniiskuse suurenemise tagajärgi metsas (Torga *et al.*, 2017; Truu *et al.*, 2017; Lõhmus *et al.*, 2019). Lisaks on uuritud Eesti metsade süsinikubilanssi põua ja kuumalaine

tingimustes (Krasnova *et al.*, 2019a) ja mullahingamise temperatuuritundlikkust (Kukumägi *et al.*, 2017).

Metsamuld on metsaökosüsteemi tähtis osa. Süsinik jõuab mulda peamiselt taimejuurte ja lehevarise kaudu. Muld võib olla nii CO₂ talletaja kui ka allikas, sõltuvalt kas mulda talletunud CO₂ kogus ületab tagasi atmosfääri eraldunud CO₂ koguse (Malhi *et al.*, 1999). Boreaalsete metsaökosüsteemide metsamullad on süsiniku pikaajalise ladustamise hoidlad, mistõttu on neil potentsiaal mõjutada globaalset süsiniku tasakaalu (Kreyling, 2010).

Maismaa ökosüsteemides on mullasüsinikku 2500 Gt, millest 1550 Gt on orgaaniline ja 950 Gt anorgaaniline mullasüsinik (Batjes, 1996). Mulla orgaaniline aine sisaldab 58% süsinikku (Mann, 1986). Mullas on orgaanilist süsinikku kolm korda rohkem kui atmosfääris ja viis korda rohkem kui taimestikis (Kauer, 2014). Hooajaliselt lumega kaetud mullad sisaldavad 20–30% globaalsest orgaanilisest süsinikuvarust, olles olulised atmosfäärsse CO₂ talletajad (Stielstra *et al.*, 2015).

Metsa aluspind (*forest floor*) on mulla pindmine orgaaniline horisont ehk metsakõdu, mis sisaldab taimede maapealsete osade jäänuseid, nagu lehed, oksad, koor ja varred, mis on eri lagunemise etappides komposteerunud. Samuti kuuluvad sinna taimejuured, vetikad, seened, bakterid, seemned ja tolmuterad. Metsa aluspind on ühenduslüli maapealse elusa vegetatsiooni ja mulla vahel. Selle omadused kujunevad mulla ja taimkatte koostöös ja see on vajalik toitainete transpordil. (Waring & Running, 2007)

1.3 Talvised CO₂-vood

Talve saab defineerida mitmel viisil. Eeltalv on lumikatte moodustumine ja esimeste külmade ilmade saabumine, kui ööpäeva keskmine õhutemperatuur langeb alla 0 °C. Meteoroloogiline talv algab 1. detsembriga ja lõpeb 28. veebruariga ning astronoomiline talv algab põhjapoolkeral talvisel pööripäeval (21. või 22. detsember) ja lõpeb kevadisel pööripäeval (20. või 21. märts). Kliimaatiline talv algab püsiva lumikatte perioodiga. Kui lumikatte moodustumisele eelneb lumeta külmailmade periood, siis peetakse seda talve alguseks. (Riigi Ilmateenistus, 2018) Siinses uurimistöös käsitletakse talvist aega kui vegetatsioonivälist aega, mil ööpäeva keskmine õhutemperatuur on alla +5 °C.

Ökosüsteemi CO₂ netobilanss (NEE) atmosfääris on suvel miinimumis, sest siis on intensiivne kasvuperiood ja ökosüsteem seob CO₂-te rohkem kui seda tekib hingamisega. Talvel on NEE aasta maksimumis, sest siis pole heitlehistel taimedel lehti ja ökosüsteem eraldab rohkem CO₂-te kui seob. Metsa aluspinna CO₂-vool on olukord vastupidine. Suvel on CO₂-voog

maksimumis, sest kõrgem õhutemperatuur soodustab maapealset autotroofset- ja heterotroofset hingamist ning mullahingamist. Talvel on CO₂-voog miinimumis, kuna miinuskraadide ja öökülmadega on maapind külmunud ja võib esineda lumikatet. (Aurela *et al.*, 2002) Need asjaolud raskendavad CO₂-voo liikumist eri keskkondade vahel, sest CO₂ siseneb mulda taime juurte kaudu (Penczykowski *et al.*, 2017).

Talvist CO₂-voogu mõjutavad mitmed keskkonnaparametrid, nagu õhurõhk, tuule kiirus, õhu- ja mullatemperatuur, mulla niiskus ja lumikatte paksus. Kõik need tegurid on omavahel seotud – õhurõhk mõjutab tuule kiirust ja õhutemperatuuri, tuule kiirus omakorda CO₂ kontsentratsiooni kõikumist ja õhutemperatuur mõjutab mullatemperatuuri. (Kim & Kodama, 2012) Paksema lumikattega kaasneb kõrgem talvine mullatemperatuur, sest lumekiht hoiab maapinda soojas (Morgner *et al.*, 2010). Sõltuvalt lume paksusest reguleerib mullatemperatuur mikroobide aktiivsust, mis määrab CO₂-voo suuruse (Kim & Kodama, 2012). Peale lumekihi paksuse mõjutab CO₂-vooge ka lume tihedus (Merbold *et al.*, 2012). Hooajaliselt lumega kaetud metsaökosüsteemi süsinikuvoogudes on tähtis osa ka mulla niiskusel (Stielstra *et al.*, 2015).

Lumikate on lumesadude tagajärjel maapinnale kujunenud lumekiht. See on krüosfääri osa, mis hõlmab kõiki Maa veesüsteemi tahkes olekus olevaid osasid. Lumel on suur albeedo, väike soojusjuhtivus ning võime muutuda ühest olekust teise. (Tooming & Kadaja, 2006) Põhjapoolkeral saavutab lumikate maksimaalse ulatuse jaanuaris ja minimaalse augustis (Estilow *et al.*, 2015). Talv on oluline aastaaeg põhjapoolsete laiuskraadide ökosüsteemide taimedele. Püsiv lumikate isoleerib ja kaitseb aluspinna taimestikku ja mulda tugeva külmumise eest (Haei *et al.*, 2013). Talvised CO₂ emissioonid varieeruvad parasvöötme ja boreaalsetel aladel 10–40% sõltuvalt uurimisala kliima iseärasustest talve jooksul (Huth *et al.*, 2012).

Põhjapoolkeral on lumikate kestus ja paksus viimase 50 aasta jooksul märgatavalt vähenenud, eelkõige kevadise varasema sulamise arvelt (Kunkel *et al.*, 2016). Talvised sademed esinevad vihmamana, mille tagajärjel lumikate tekib hiljem või ei teki üldse (Viru, 2016). Talvise CO₂-voo lühiajalisi muutusi ei ole piisavalt uuritud, samuti on ebaselge, kuidas külmunud maapind mõjutab mullahingamist (Lohila *et al.*, 2007). Kõrgema talvise temperatuuriga on vähem lund, mis võimaldab mullal sügavamalt läbi külmuda, tuues kaasa väiksemad talvised CO₂ emissioonid. Samas kui vähem lund toob kaasa suurema külmumis-sulamise sageduse, siis CO₂ emissioonid on kõrgemad (Groffman *et al.*, 2001), kuigi sulamis-külmumis periood mõjutab eelkõige N₂O-vooge. Siinses töös püstitati hüpotees, et ajas CO₂-vood suurenevad, sest eeldati, et vananevas metsas kõrgem õhutemperatuur toob kaasa suuremad CO₂-vood. Kõrgem talvine

temperatuur mõjutab ka taimeliike erinevalt, mis toob kaasa muutusi liigilises koosseisus ja tootlikkuses (Kreyling, 2010).

Eesti metsi iseloomustab hooajalisus ja külmad talved. Eestis kestab püsiv lumikate keskmiselt 83 päeva ehk ligi 3 kuud. Püsiv lumikate kirjeldab üldist talve iseloomu. Selle põhjal saab teha järeldusi, kas lumi kattis maad pikalt ja järjepidevalt või olid lumeolud heitlikud. Alates detsembrist muutub lumikate järjest paksemaks, saavutades maksimumi veebruari lõpus või märtsi alguses, millele järgneb kiire sulamine märtsi teises pooles või aprilli alguses. (Viru, 2016) Lumikattega päevi on Eestis jäänud oluliselt vähemaks. Ajavahemikus 1950–2016 on lumikatte periood lühenenud keskmiselt 27 päeva võrra. Enim on lumikatte kestus lühenenud Mandri-Eesti kesk- ja lääneosas. (Viru & Jaagus, 2020)

1.4 Meetodid CO₂-voogude mõõtmisel

Ökosüsteemi ja atmosfääri vahelise CO₂-voo mõõtmisel saab kasutada erinevaid meetodeid. Peamised on turbulentsed õhuvoo, kontsentratsiooni gradiendi ja kambri meetodid. Kambrimeetodiga saab mõõta KHG vooge maapinnalt kindlalt piiritletud punktides. Esimesed mõõtmised kambrimeetodiga tehti juba 1922. aastal. (Pumpanen *et al.*, 2010) Selle meetodi peamine eelis on universaalsus (Aro, 2014), mistõttu on see tänapäevani laialdaselt kasutusel. Kambrid on kerge mööda uurimisala kanda, nendega saab teostada mõõtmisi mosaiiksetes ökosüsteemides ja kasutada erinevatel pinnamoodidel. Kambrimeetodiga saab jälgida väikeseid gaasivoogude muutusi ja leida 100 korda väiksemaid emissioone kui seda suudavad mikrometeoroloogilised vahendid. (Denmead, 2008)

Kasutusel on kahte tüüpi kambrid, avatud ja suletud kambrid, mis omakorda jagunevad staatiliseks ja dünaamiliseks. Avatud kambri läbib konstantne õhuvool kambri ülemist osa, mille kaudu mõõdetakse kambri sisenewa ja väljuva õhu kontsentratsiooni erinevust. See ei ole aga nii levinud meetod, kuna kambri on mehaaniliselt keerulisemad ja suuremaid kontsentratsiooni muutusi on raskem leida. Suletud staatilised kambrid on gaasitihedad, kus sensori ja kambri vahel ei ole õhuringlust, seega kogutakse proovid eelevalkumeeritud klaaspudelisse, mida analüüsitakse hiljem laboris. Suletud dünaamilises kambri on õhk kambri ja gaasianalüsaatori vahel ringluses, mis võimaldab koheselt leida voo gaasikontsentratsiooni erinevustest. (Denmead, 2008)

Nii staatilisel kui dünaamilisel suletud kambrimeetodil on omad puudused. Veid mõõtmistulemustes võivad tulla vertikaalse CO₂ kontsentratsiooni gradiendist, mis on tingitud CO₂ kontsentratsiooni erinevusest kambri sisenewa ja välise õhu vahel. Kambris võib CO₂

kontsentratsioon tõusta kõrgemale kui välisõhus, sest kamber katab mulda pikka aega, mis muudab looduslikku kontsentratsiooni gradienti nullas. Sellest tulenevalt võib mullahingamine oluliselt väheneda. Veel võib probleeme valmistada vertikaalne rõhugradient. Kui kambri sees oleva õhu ja välisõhu vahel on erinev rõhk, võib see tekitada vigu mõõtmistulemustes. Samuti võib mõõtmistulemusi mõjutada kambri sees oleva niiskuse ja temperatuuri kõikumine ning probleemid, mis on seotud kambri rõnga sisestamissügavusega. (Aro, 2014)

Kambrimeetodiga saab mõõta mullahingamist, nii autotroofset (R_a) kui ka heterotroofset (R_h). Samas on võimalik mõõta ainult heterotroofset hingamist, kui eemaldada mõõdetavast punktist kõik taimeosad (*trenching technique*), et mitte arvestada autotroofset hingamist (Savage *et al.*, 2018). Sõltuvalt töö eesmärgist saab vooge mõõta pimekambrite ja läbipaistvate kambritega. Pimekamber ei lase valgust läbi, tekitades kambri alla öise keskkonna, mil ei toimu fotosünteesi. See väljendab mullast eralduvat CO_2 -voogu maapinna pinnauhiku kohta ajaühikus. Läbipaistvat kambrit saab kasutada ökosüsteemi NEE mõõtmiseks, kuna see laseb valgust läbi ja võimaldab kaasata mõõtmistesse fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse ja taimede maapealsete osade CO_2 sidumise (Wang *et al.*, 2013).

Turbulentse õhuvoo ehk *Eddy Covariance* (EC) meetod võeti kasutuses 1975. aastal. EC on mikrometeoroloogiline meetod, mis mõõtab CO_2 -vooge ökosüsteemi skaalas. Helianemomeetri ja infrapunagaasianalüsaatoriga varustatud EC süsteem on paigutatud torni otsa, mis mõõdab vertikaalse tuule kiiruse ja gaaside segunemise vahelist kovariatsiooni. Selle meetodi eeliseks on järjepidevad mõõtmised ja vähene keskkonnahäiring. Samas ei sobi EC meetod igale pinnamoe tüübile – ökosüsteem peab olema tasane, homogeenne ja turbulents peab olema piisavalt tugev, et toimiks CO_2 segunemine. (Baldocchi *et al.*, 1988) EC meetodiga saab tuletada hinnangulise ökosüsteemi hingamise ja GPP (Luyssaert *et al.*, 2007), kuid ei saa mõõta üksikuid CO_2 -vooge, mis tulevad mulla orgaanilisest ainest või taimedest.

Kontsentratsiooni gradiendi meetodiga mõõdetakse CO_2 sisaldust mulla eri kihtides. Mulda paigutatud horisontaalselt pikliku plastiktoru pinnale puuritakse augud, et gaas pääseks sisse (Maljanen *et al.*, 2003). Meetod ei ole nii laialdaselt kasutusel, samas on see kasulik, kui on vaja eraldada maapealse vegetatsiooni ja mulla enda CO_2 -vooge (Pumpanen *et al.*, 2010). Gradiendi- ja kambrimeetodi tulemused on sarnased, mistõttu eelistatakse kambrimeetodit, sest kambri abil saab lisaks mullahingamisele mõõta ka taimede maapealsete osade mõju atmosfääri CO_2 kontsentratsiooni muutustele (Aro, 2014).

Erinevad meetod võimaldavad mõõta CO₂-vooge ja teisi KHG mitmesugustelt aluspindadelt, nagu metsad ja märgalad. Metsaökosüsteemis on levinud nii kambri kui ka EC meetodil tehtud uuringud (Stielstra *et al.*, 2015; Sever *et al.*, 2019). Lucas-Moffat *et al.* (2018) uuringus võrreldi suletud kambrimeetodi ja EC meetodi põllumaa CO₂ netobilanssi (NEE) mõõtmistulemusi ning selgus, et eri meetoditega mõõdetud vood olid tugevalt korrelatsioonis. Eestis on metsades tehtud uuringutes kasutatud põhiliselt EC meetodit, et mõõta aastast NEE-d ja hinnata, kas ökosüsteem on süsiniku talletaja või allikas. Samas mullahingamisel on põhiliselt kasutatud suletud kambrimeetodit. Paljud uurimused on metsaökosüsteemi süsinikubilansist ülevaate saamiseks kasutanud ka mitut meetodit samaaegselt (lisa 4).

Tehtud on ka ainult talvisele ajale keskendunud uuringuid. Huth *et al.* (2012) mõõtsid Saksamaal ja Alm *et al.* (1998) Soomes talviseid KHG suletud kambrimeetodiga. Lohila *et al.* (2007) uurisid Soomes talviseid CO₂-vooge suletud kambrimeetodi ja EC meetodiga, kus ainsad erinevused tulenesid autorite arvates aluspinnaliigist ja taimestikust. Suurematel laiuskraadidel ei ole paksu lume korral enam võimalik CO₂-vooge kambrimeetodiga mõõta. Kim & Kodama (2012) uurisid Alaskal paksu lumikattega CO₂-vooge hoopis NDIR CO₂ sensoritega, talviste kuudena võeti arvesse ajavahemik, mil lumekihi paksus oli üle 25 cm. Samal alal oli varasemalt tehtud mõõtmisi ka kambrimeetodiga (Kim *et al.*, 2007). Eestis ei ole metsaökosüsteemides tehtud palju uuringuid, mis käsitleksid talvise aja CO₂-vooge. Põhiliselt on metsa süsiniku-uuringud keskendunud CO₂-voo mõõtmisele vegetatsiooniperioodil (lisa 4).

2. Metoodika

2.1 Uurimisala kirjeldus

Uurimisala asub Eestis, Valga maakonnas, Tõrva vallas, Soontaga külas (58°01'24"N, 26°04'15"E, kõrgus 53 meetrit üle merepinna; lisa 1). Soontaga metsaökosüsteemis on kuni 230-aastane okasmets, kus peapuuliik on harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.) ja teises rindes domineerib harilik kuusk (*Picea abies* L. Karst). Uurimisjaama ümber on nii keskealisi 60 aastaseid, küpseid 110 aastaseid kui ka vanu, üle 200 aastaseid, männipuistuid. Peamiselt esinevad kõrge tootlikkusega jänesekapsa ja pohla kasvukohatüübid (Kuusik & Hirse, 2018). Aluskatte taimestik domineerivad samblikud ja peamine mullatüüp on kerge lõimisega happeline nõrgalt leetunud leedeliivmuld (L1), tüüpprofiiliga O-Ea-Bhf-C. Uurimisala asukoht valiti sinna põhjusel, et ala on tasane ja ümbritsetud homogeense metsaökosüsteemiga. (Soosaar *et al.*, 2014)

Uurimisala asub Sakala ja Otepää kõrgustike vahelises Valga nõos, Soontaga looduskaitsealal. Looduskaitseala üks kaitse-eesmärk on hariliku männi genofondi säilitamine (Riigi Teataja, 2006). Kaitseala vahetus läheduses lääne suunas on Väike Emajõgi ja mõõtmisalast *ca* 300 m edelasuunas on Soontaga ojal asuv Saeveski paisjärv. Kaitseala metsi läbib tihe kohaliku tähtsusega kruusa- ja pinnasteede võrgustik, kuid suurem, Tõrva-Kuigatsi maantee, jääb *ca* 3 km kaugusele lõunasuunas.

Uurimisala ümbritsevad peamiselt suhteliselt viljakad, keskmise boniteediga metsad (Drenkhan, 2004). Uurimisala jääb 35 elanikuga Soontaga küla maadele, kus lähim suurem asustus on *ca* 15 km loodes paiknev Tõrva linn 2703 elanikuga (01.01.2019 aasta seisuga) (Statistikaamet, 2019), seega õhusaastet põhjustavat tootmistegevust mõõtejaama ümbruses ei toimu. Piirkonna kliima on mõõdukalt jahe ja niiske, aasta keskmine õhutemperatuur on 4,5 °C, vegetatsiooniperioodi pikkus 170 päeva ning aastane keskmine sademete hulk on 650 mm (Drenkhan, 2004).

2.2 CO₂-voo mõõtmine

CO₂-vood mõõdeti Soontaga uurimisjaamast kasutades suletud staatilist pimekambrimeetodit (Hutchinson & Livingston, 1993). Selleks kasutati valgeid ja läbipaistmatuid 65-liitriseid, poolemeetriselise diameetri ja 0,4 meetri kõrgusega polüvinüülkloriidi (PVC) kambreid (joonis 3). Kokku kasutati kuut mõõtekambrit, mis asetati juhuslikkuse meetodi alusel uurimisalale, jälgides et kambrite vahel oleks vähemalt kaks meetrit.

Gaasiproovid võeti hommikupoolikuti kahepäevase intervalliga. Päeval ajal temperatuurid muutuvad, mõjutades ka vooge, mistõttu koguti proovid iga kord samal kellaajal. Mõõtmisel asetati läbiõhutatud kamber varem, mõõteperioodi alguses (2012 aasta mais), 10 cm sügavusele maapinda paigaldatud rõngale, kuhu sisse jäi ka aluskatte taimestik. Rõnga pealmises osas asuv soon täideti proovivõtu ajaks veega, et tagada õhukindlus kambri serva ja rõnga vahel. Gaasiproovid koguti ühe tunni jooksul spetsiaalsetesse eelnevalt vakumeeritud 100 ml klaaspudelitesse. Kambris oleva algkontsentratsiooni fikseerimiseks võeti nullproov ning seejärel kolm järgmist proovi 20-minutilise intervalliga.

Soontaga mõõtejaam kuulub Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduste instituudile, kus gaasiproove on kogunud ökotehnoloogia ja maastike aineriingeringute töörühm. KHG voogude mõõtmistega alustati 2012. aasta mais. Lisaks süsihappegaasile on võetud ka metaani ja lämmastikdioksiidi proove. See uurimistöö kasutab andmeid alates 2013. aasta suveperioodist, sest sellest ajast on olemas pidev aegrida kahepäevase intervalliga.

Lumikatte ja õhutemperatuuri andmed saadi uurimisjaamast ca 30 km kaugusel asuvast Valga meteoroloogiajaamast (57°47'18"N, 26°02'00"E). Püsiva lumikatte kestuse (alguse- ja lõpukuupäeva) ning lumikattega päevade arv on leitud varasema uurimuse jaoks (Viru, 2016), kasutades Ilmateenistusest saadud ööpäevaseid lumekihi paksuse andmeid.



Joonis 3. Varem maapinda asetatud rõngas aluskatte taimestikuga (vasakul), PVC-kamber (paremal), detsember 2019.

2.3 Andmetöötlus

CO₂ sisaldus proovides määrati Tartu Ülikooli geograafia osakonna loodusgeograafia ja maastikuökoloogia õppetooli maastiku aineringe laboris Shimadzu GC-2014 gaas-kromatograafia. Voogude arvutamisel arvestati, et CO₂ kontsentratsioon muutub kambri lineaarselt.

Andme kvaliteedi kontrollil kasutati Pearsoni korrelatsioonikordajat ja lähtuti põhimõttest, et regressioonikoefitsient on statistiliselt oluline usaldusnivool 95%. Parima lineaarse tõusu saavutamiseks valiti neljast punktist välja kolm (abc, abd, acd, bcd), mis moodustasid suurima determinatsioonikordaja ehk R-ruudu väärtuse ning eemaldati punkt, mis erines teistest enim. Tugeva positiivse korrelatsiooni korral ($R^2 > 0,95$) jäeti kõik neli punkti alles. Juhul, kui ühe punkti eemaldamisel oli R-ruut väiksem soovitud väärtusest, siis selle kambri proovi andmeanalüüsis ei arvestatud.

Andmeanalüüsis kasutati programme Microsoft Office Excel ja Statistica 7. CO₂-voo arvutamiseks leiti algselt süsiniku sisaldus mikrogrammides valemiga:

$$F = \frac{M \times P \times V \times \delta v}{R \times T \times t \times A}$$

CO₂ sisaldus F ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) arvutati CO₂ molaarmassi M (44 g/mol), normaalrõhu P (101300 Pa), kambri ruumala V (0,0655 m³), lineaarse tõusu δv [ppm(v)], gaasikonstandi R (8,314 m³ Pa K⁻¹ mol⁻¹), labori temperatuuri T (293,15 K), mõõteperioodi aja t (1 h) ja pimekambri all oleva ala pindala A (0,19625 m²) kaudu. Seejärel teisendati saadud tulemus milligrammideks. Leiti ühe mõõtmiskorra kuue kambri aritmeetiline keskmine ning iga kuu keskmine CO₂-voog. Et võrrelda talviste voogude osakaalu aastasest, teostati analüüs ka suviste voogude kohta.

Andmete analüüsi alguses kontrolliti valimi vastavust normaaljaotusele kasutades Kolmogorovi-Smirnovi, Lillieforsi ja Shapiro-Wilksi teste. Kuna andmed vastasid normaaljaotusele, kasutati andmeanalüüsis parameetrilisi teste. CO₂-voo ja õhutemperatuuri ning CO₂-voo ja lumikatte paksuse vahelised seoste leidmiseks kasutati Pearsoni korrelatsioonikordajat. Vaadati seose statistilist olulisust (p) ning seose tugevust ja suunda (r). Andmeanalüüsis kasutati olulisuse nivood $\alpha = 0,05$. Võrreldi omavahel nii talviseid kuu keskmisi väärtusi kui ka mõõtmispäevade kuue kambri keskmisi väärtusi.

Eri aastate vahelisi talviste CO₂-voogude võrdlemiseks kasutati korrelatsioonimaatriksit, et näha aastate vahelisi seoseid. Eri aastate vahelisi talviste CO₂-voogude erinevuste leidmiseks

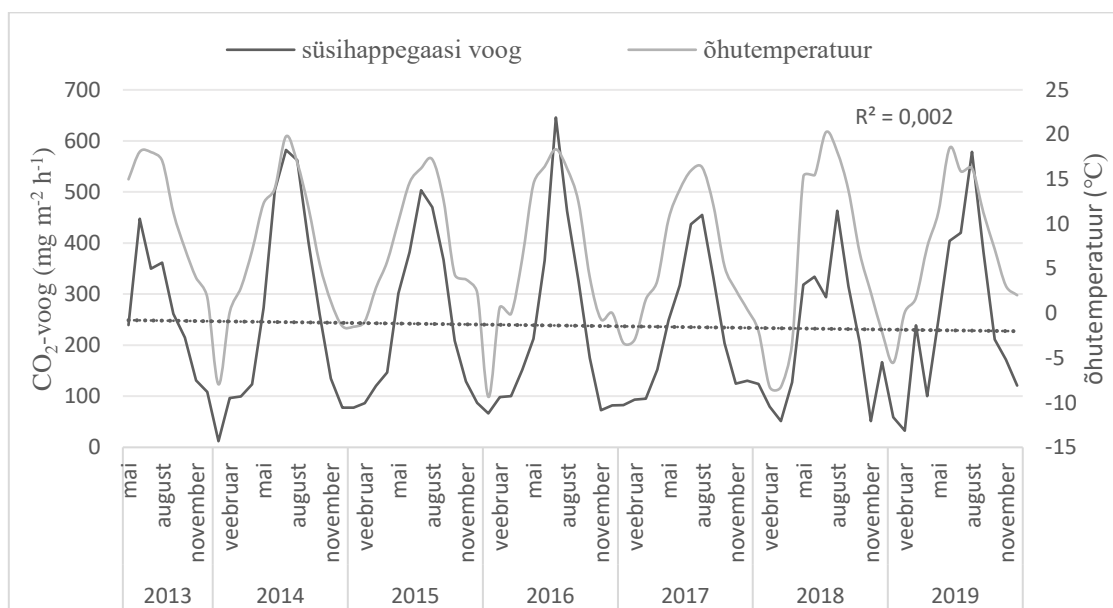
kasutati parameetrilist (one-way ANOVA) testi, et näha kas aastad üksteisest statistiliselt oluliselt erinevad või mitte.

Talvine aeg on siin töös määratletud kui vegetatsiooniväline aeg, mil ööpäevane keskmine õhutemperatuur on püsivalt alla +5 °C (Linderholm, 2006). Andmeanalüüsil kasutati kuu keskmisi väärtusi ning lähtuti põhimõttest, et kui ühes kuus üle poolte päevade jääb ööpäeva keskmine õhutemperatuur alla +5 °C, siis kaasati see kuu talviste kuude arvestusse. Juhul, kui see nii ei olnud, seda kuud talvise kuude hulka ei arvestatud.

3. Tulemused

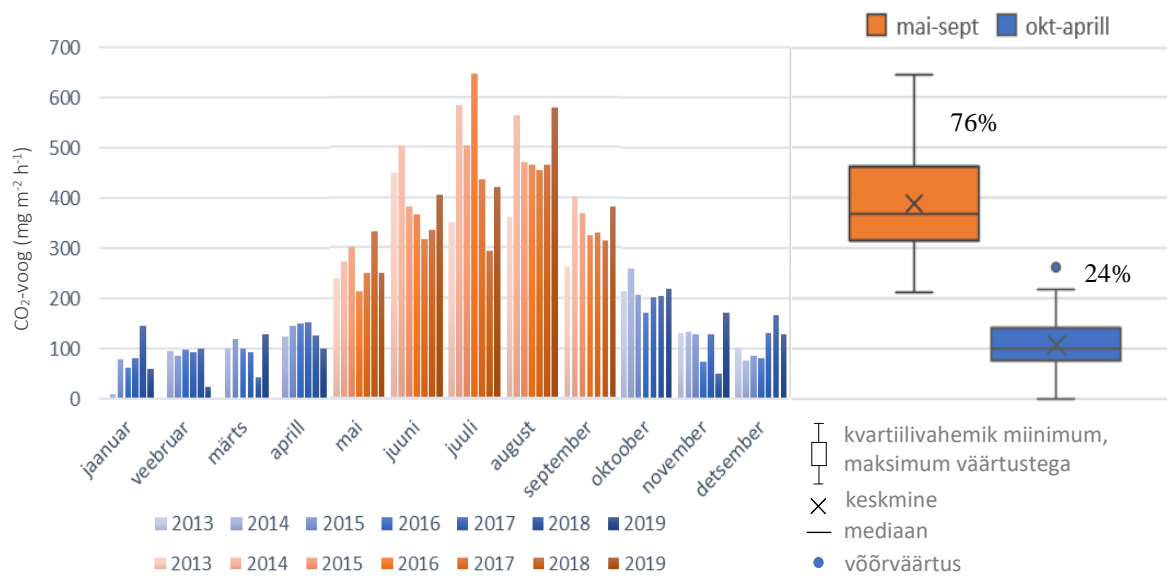
3.1 Talvise CO₂-voo osakaal aastasest voost

2013–2019 aastatel varieerusid CO₂-vood vahemikus 12,1–645,9 mg m⁻² h⁻¹. Suurim mõõdetud CO₂-voog esines 2016 aasta juulis olles 645,9 mg m⁻² h⁻¹ ja väikseim 2014 aasta jaanuaris 12,1 mg m⁻² h⁻¹. Joonisel 4 on näha CO₂-voo aastane käik ja kuu keskmine õhutemperatuur aastatel 2013–2019. CO₂-voo, nagu ka õhutemperatuuri, puhul tuleb välja selge sesoonsus: suvisel ajal on CO₂-voog suurem ja talvisel ajal väiksem. Kõrgema õhutemperatuuriga on metsa aluspinna ja atmosfääri vaheline CO₂-voog intensiivsem. 2013-2019 perioodi jooksul CO₂-voo trend ajas oluliselt ei muutunud.



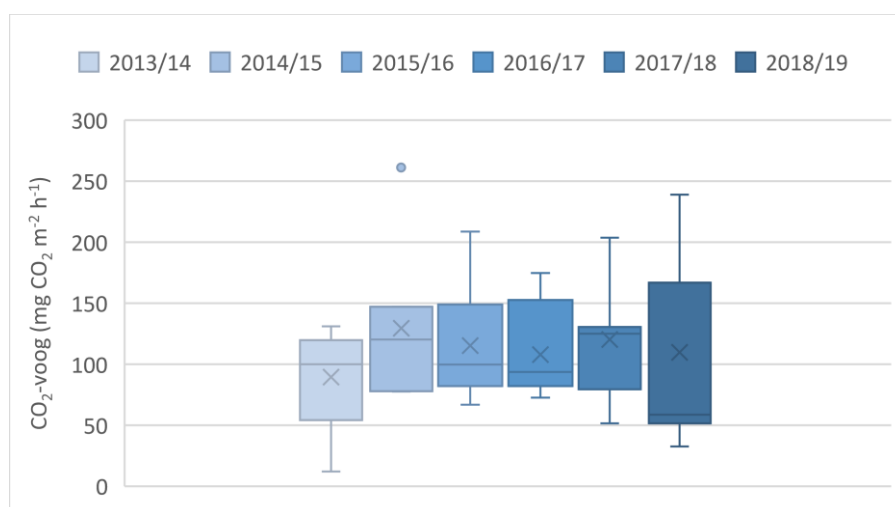
Joonis 4. Kuu keskmiste õhutemperatuuride ja CO₂-voogude käik 2013–2019 aastatel, lineaarne trendijoon CO₂-voogude kohta.

2013–2019 aastatel kogutud proovide vahel ei olnud aastati suurt varieeruvust. Eri aastatel jäid CO₂-vood igal kuul üldiselt samasse vahemikku. Aprillis ja oktoobris olid CO₂-vood suhteliselt ühtlased ilma suuremate kõrvalekalleteta. Samas oli juhuseid, kus ühe aasta kuu keskmine voog erines märgatavalt teistest aastatest, näiteks 2018 aasta jaanuar ja 2019 aasta november (joonis 5). Suvisel ajal olid erinevused aastate vahel suuremad, kõige rohkem varieerusid CO₂-vood juulis: väikseim voog oli 294,0 mg m⁻² h⁻¹ 2018 aasta suvel ja suurim voog 645,9 mg m⁻² h⁻¹ 2016 aastal. Talvise CO₂-voo osakaal aastasest voost on välja toodud joonisel 5. Seitsme aasta keskmiste väärtuste põhjal moodustas suvine CO₂-voog 76% ja talvine 24% kogu aastate keskmistest voogudest, ehk talvised CO₂-vood moodustasid ligi veerandi aastasest voost.



Joonis 5. 2013–2019 aastate CO₂-voo väärtused kogu aasta vältel (jaanuar–detsember) ning talviste ja suviste voogude osakaal seitsmeaastaste keskmiste väärtuste põhjal.

Talviste CO₂-voogude aastate omavahelised erinevused on välja toodud joonisel 6. Üldiselt jäid kõikide aastate talvised CO₂-vood samasse vahemikku, ilma suuremate erinevusteta. Statistiliselt olulist aastate vahelist erinevust talviste CO₂-voogude puhul ei olnud ($p < 0,515$). Kõige madalamad talve keskmised CO₂-vood olid 2013/14 ja 2016/17 hooaja talvedel, vastavalt 89,5 ja 107,7 mg m⁻² h⁻¹. Kõige kõrgemad talve keskmised CO₂-vood olid 2014/15 ja 2017/18 hooaja talved, vastavalt 129,3 ja 120,2 mg m⁻² h⁻¹. Aastate vahelised talvised CO₂-vood olid omavahel seotud: kolmel juhul oli eri aastate vahel statistiliselt oluline tugev seos (lisa 3).



Joonis 6. Talviste CO₂-voogude erinevused aastate lõikes kvartiilivahemikuga, miinimum ja maksimum väärtustega, keskmise ja mediaaniga.

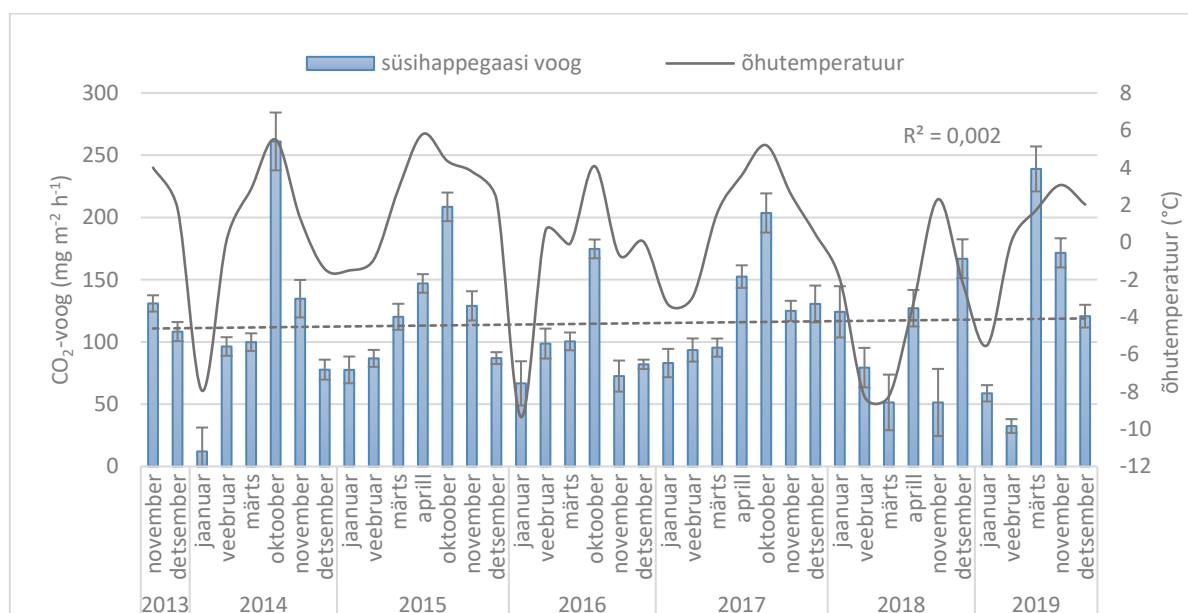
3.2 Õhutemperatuuri ja CO₂-voo vaheline seos

Kuud, mida arvestati talviste kuude hulka varieerusid aastati (tabel 1). 2013, 2018 ja 2019 algas vegetatsiooniväline aeg novembris, teistel aastatel oktoobris. 2014, 2016 ja 2019 lõppes vegetatsiooniväline aeg märtsis, ülejäänud aastatel lõppes see aprillis. Meetodika, mille alusel määrati talviseid kuid, on lahti seletatud peatükis 2.3. Mõõteperioodi jooksul õhutemperatuuride trend oli ajas langev (lisa 2).

Tabel 1. Talviste kuudena arvestatud kuud ja nende kuu keskmised õhutemperatuurid.

aastad	algus	°C	lõpp	°C
2013/14	nov	4	märts	2,9
2014/15	okt	5,5	aprill	5,8
2015/16	okt	4,4	märts	-0,1
2016/17	okt	4,1	aprill	3,6
2017/18	okt	5,2	aprill	-3,3
2018/19	nov	2,3	märts	1,7
2019	nov	3,1	dets	2,0

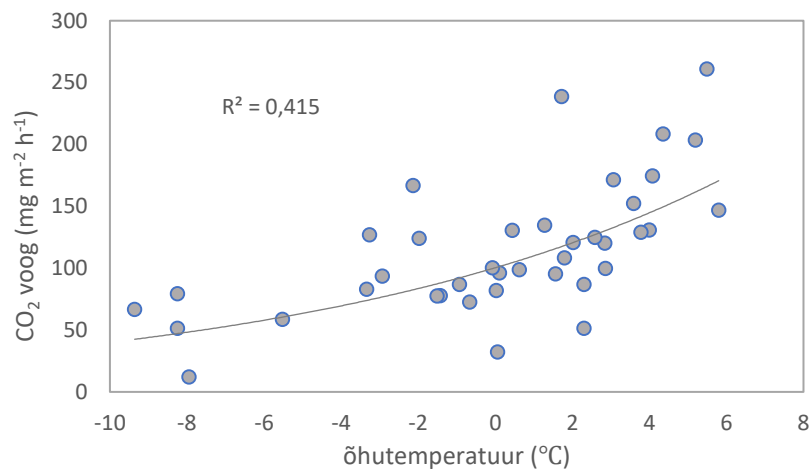
Talvise aja kuu keskmised CO₂-vood ja õhutemperatuurid on esitatud joonisel 7. Ka siin on näha, et kõrgemate talviste õhutemperatuuride korral on CO₂-vood suuremad ning kui õhutemperatuur langeb on ka vood väiksemad. Talvisel ajal oli suurim voog 2014 oktoobris 261,1 mg m⁻² h⁻¹ ja väikseim sama aasta jaanuaris 12,1 mg m⁻² h⁻¹. Kõikide talviste kuude keskmine CO₂-voog oli 113,0 mg m⁻² h⁻¹. Talvise CO₂-voo trend oli ajas tõusev (lisa 2), kuigi seitsme aasta jooksul talvine CO₂-voog statistiliselt oluliselt ei suurenenud.



Joonis 7. Talvise aja kuu keskmise CO₂-voogu ja õhutemperatuuri seos, trendijoon 2013–2019 aastate talviste CO₂-voogude kohta.

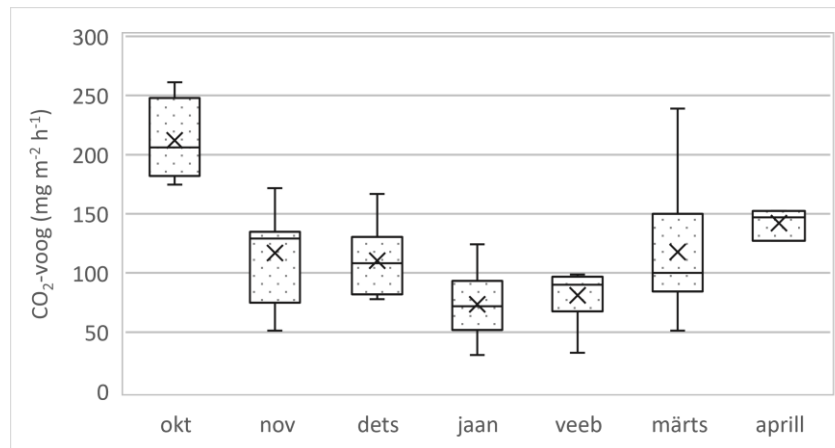
Kõige madalam oli kuu keskmine õhutemperatuur 2016. aasta jaanuaris ($-9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja kõrgem 2015. aasta aprillis $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kõige madalam kogu talve keskmine õhutemperatuur oli 2017/18 hooaja talvel ($-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja kõrgem 2014/15 hooaja talvel $+1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. CO_2 -voo ja õhutemperatuuri vahel on positiivne seos, mis on statistiliselt usaldusväärne nii kuu keskmiste ($r = 0,63$; $p < 0,0001$) kui ka mõõtmispäeva keskmiste ($r = 0,65$; $p < 0,00000$) väärtuste puhul.

Talvise aja kuu keskmise CO_2 -voo ja kuu keskmise õhutemperatuuri vaheline seos on graafiliselt esitatud joonisel 8. Positiivne seos näitab seda, et kõrgemate õhutemperatuuridega on ka CO_2 -vood suuremad.



Joonis 8. Talvise CO_2 -voo ja õhutemperatuuri vaheline seos, kuu keskmiste väärtuste põhjal.

Talviste kuude omavahelisel võrdlusel on samuti näha, et külmematel talvekuudel nagu jaanuar ja veebruar on CO_2 -vood väiksemad kui kevad- ja sügiskuudel (joonis 9). Talviste kuude kõikide aastate keskmiste väärtuste põhjal on väikseimad CO_2 -vood jaanuaris $70,4\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ ja suurimad oktoobris $210,3\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$.

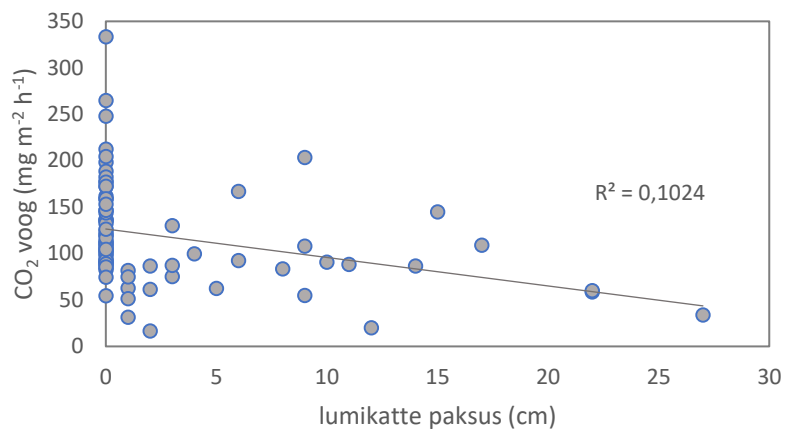


Joonis 9. Talviste CO₂-voogude osakaal kuude kaupa 2013–2019 aastatel. Joonis näitab kuu CO₂-voogu kvartiilvahemikuga, miinimum ja maksimum väärtustega, keskmise ja mediaaniga.

3.3 Lumikatte ja CO₂-voo vaheline seos

Kõige varem moodustus püsiv lumikatte 17. detsembril 2018/19 ja kõige hiljem 14. veebruaril 2015/16 talvel. Kõige varem lõppes püsiva lumikattega periood 22. jaanuaril 2016/17 ja kõige hiljem 24. märtsil 2017/18 talvel. Lumikatte paksuse ja talvise CO₂-voo vahel on statistiliselt oluline negatiivne seos. Nii kuu keskmiste ($r = -0,48$; $p < 0,003$) kui ka mõõtmispäeva ($r = -0,32$; $p < 0,004$) väärtustega on seos statistiliselt usaldusväärne.

Kõige rohkem lumikattega päevi oli 2017/18 talvel, mil lumi oli maas 105 päeva (lumikatte paksus vähemalt 1 cm). Kõige vähem lumikattega päevi oli 2013/14 talvel kui lumikattega päevi oli 47. Seitsme aasta vältel lumikattega päevade arvu trend ajas tõusis (lisa 2). Kõige lumerohkemad olid 2017/18 ja 2018/19 talved ja kõige vähem lund oli 2013/14 talvel. Joonisel 10 on graafiliselt esitatud CO₂-voo ja lumikatte vaheline negatiivne seos. Rohkemate punktide väljendamiseks kasutati kuu keskmiste väärtuste asemel mõõtmispäeva kuue kambri keskmisi CO₂-voo väärtusi. Kui lumikatet ei esinenud oli väärtuseks 0. Negatiivne seos näitab seda, et paksema lumikattega olid CO₂-vood väiksemad.



Joonis 10. CO₂-voog ja lumikatte paksuse vaheline seos, mõõtmispäeva kuue kambri keskmine CO₂-voog ja mõõtmispäeva ööpäeva keskmine lumikatte paksus.

4. Arutelu

Uuringu tulemusi on võrreldud varasemate Eestis tehtud uuringute omadega, kus on käsitletud CO₂-vooge erinevates metsatüüpides. Pika andmerekajaga talvist aega hõlmavad uuringuid ei ole Eesti metsaökosüsteemides piisavalt tehtud. Sellest tulenevalt on talviseid CO₂-vooge võrreldud teistes piirkondades, eri aluspinnaliikidel tehtud uuringute omadega.

Uurimuses otsiti vastust küsimusele, kui suur osakaal on talvisel CO₂-vool aastasest metsaökosüsteemi CO₂-voost. Leiti, et seitsme aasta keskmiste väärtuste põhjal moodustas talvine CO₂-voog 24% kogu voogudest. Talvised kuud hõlmasid vahemikku oktoober/november kuni märts/aprill (tabel 1). Sarnase tulemuseni on jõutud ka teistes uurimustes, kus on hinnatud talvise aja CO₂-vooge. Almi *et al.* (1998) uuringus, mis tehti turbaaladel ligikaudu 20 aastat tagasi, moodustas talvine (november–mai) CO₂-voog 21% aastasest voost. Lohila *et al.* (2007) järgi oli talvise (detsembri algus–märtsi keskpaik) CO₂-voo osakaal turvasmullal 23% aastasest CO₂ netobilansist. Huth *et al.* (2012) hindasid talvist (november–märts) CO₂-voo osakaalu soos 25% ning Kimi ja Kodama (2012) uuringus moodustas talvine (detsember–aprill) CO₂-voo osakaal metsamullas 20% aastasest voost.

Siinses töös leitud talvise CO₂-voo osakaal langeb üldiselt kokku varasemate uuringute omaga. Protsentide varieeruvust võib põhjendada aluspinnaliigiga: Soontaga metsaökosüsteem asub pigem viljakal mullal, kuid võrreldud uuringud on tehtud enamjaolt vähem viljakatel turvasmuldadel, kus üldiselt CO₂-voo protsessid erinevad metsadest. Üldiselt jääb parasvöötme ja boreaalsete alade talvine CO₂ emissioon vahemikku 10–40% (Huth *et al.*, 2012) ning arktilistel aladel, kus lumikate kestab üle 200 päeva, moodustab talve CO₂ emissioon 10–30% aastasest mullahingamisest (Kim & Kodama, 2012). Lisaks aluspinnaliigile võib erinevusi talvise CO₂-voo osakaalus põhjustada kasutatud meetod ja talvekuude hulka arvestatud kuud.

Esimene hüpotees leidis kinnitust: kõrgem talvine õhutemperatuur toob kaasa suurema CO₂-voo metsaökosüsteemis. Õhutemperatuuri tõusuga suurenevad CO₂-vood ja selle langedes on ka vood väiksemad. Teised Eesti metsades tehtud uuringud on jõudnud sarnaste tulemusteni. Samal Soontaga uurimisalal aastatel 2013/14 tehtud uuringus näitasid mullahingamise väärtused selget hooajalisust, kus CO₂-vood olid väiksemad taimede puhkeperioodil (november–märts) ja suuremad kasvuperioodil (Soosaar *et al.*, 2014). Ka Uri *et al.* (2019) on toonud esile, et temperatuur on selge hooajalise dünaamikaga, mille maksimum on suvel ja miinimum talvel. Talvisele ajale keskendunud uurimused on samuti leidnud tugeva korrelatsiooni CO₂-voo ja õhutemperatuuri vahel (Lohila *et al.*, 2007; Kim & Kodama, 2012).

Peale õhutemperatuuri mõjutab metsa aluspinna hingamist ka mullatemperatuur. Seost mullatemperatuuri ja -hingamise vahel on leitud mitmes varasemas Eestis tehtud uurimuses (Soosaar *et al.*, 2010; 2014; Varik *et al.*, 2015). Kriiska *et al.* (2019) uurimuses leiti, et mullatemperatuur on peamine tegur, mis põhjustab mullahingamise hooajalist muutust. Mullatemperatuur kirjeldas männipuistus 73% mullahingamise kõikumisest ja kuusepuistus 76% (Kriiska *et al.*, 2019) ning noores männikus 72% (Uri *et al.*, 2019). Praeguses uuringus mullatemperatuuri ei kasutatud. Samas mõjutab õhutemperatuur otseselt mullatemperatuuri, millega leiti tugev statistiliselt oluline seos, seega võib eeldada ka seost mullatemperatuuri ja -hingamise vahel.

Uurimuses otsiti vastust ka küsimusele mil määral lumikatte paksus mõjutab CO₂-vooge talvises metsaökosüsteemis. Selgus, et lumikattel on samuti tähtis roll metsa aluspinna CO₂-voogudes. Lumikatte paksuse ja talvise CO₂-voo vahel leiti statistiliselt oluline negatiivne seos. See näitab, et paksema lumikattega olid CO₂-vood väiksemad ja mida õhem oli lumikate, seda suuremad olid CO₂-vood. Samas ei ole aga lumikatte paksust mõõdetud voogudega samast kohast, vaid meteoroloogilise mõõtejaama lagedalt alalt, mis võib kaasa tuua erinevusi lumikatte paksuses ja tulemuste täpsuses.

Teine hüpotees ei leidnud kinnitust: seitsme aastaga talvine CO₂-voog statistiliselt oluliselt ajas ei suurenenud. Talvede omavahelisel võrdlemisel selgus, et kuigi CO₂-voo trend oli ajas tõusev, CO₂-vood üksteisest statistiliselt oluliselt ei erinenud. Samuti oli lumikattega päevade arvu trend ajas tõusev, seevastu õhutemperatuuri trend oli ajas langev. Samas on olukord vastupidine kui vaadata pikaajalisemaid muutusi Eestis: lumikattega päevi jääb aastatega vähemaks (Viru & Jaagus, 2020) ja õhutemperatuur tõuseb (Luhamaa *et al.*, 2014). Ajaline piirang võib olla põhjendus, miks hüpotees ei leidnud kinnitust ja lumikattega päevade arv ja õhutemperatuur on vastupidised võrreldes pikaajalisemate trendidega. Seitse aastat on kliima mõistes väga lühike aeg, et hinnata muutusi ja teha järeldusi.

Nagu selgus, talvine CO₂-voog statistiliselt oluliselt ajas ei suurenenud. CO₂-voogude väärtusi saaks võrrelda teiste talvisele ajale keskendunud uuringutega, et teha pikaajalisemaid üldistusi CO₂-voogude muutuste kohta. Samas on uuringuid tehtud eri aluspindadel (enamasti soos või turbaaladel), eri vööndites (boreaalne, parasvöötme või arktiline), kasutades eri meetodeid, mis muudavad keeruliseks nende omavahelise võrdlemise. Kõik proovid on kogutud päevasel ajal, mistõttu öised CO₂-vooge ei ole arvestatud. Arvestada tuleb ka asjaolu, et kahe korra proovidest on tehtud üldistusi kogu kuu kohta, mis aga ei pruugi kirjeldada terve kuu üldist iseloomu. Samas kõrgem õhutemperatuur ei pruugi tingimata kaasa tuua suuremaid CO₂-vooge. Groffman

et al. (2001) uuringus toodi välja, et kui lund on vähem kõrgema talvise temperatuuri tõttu, siis võivad CO₂-vood olla väiksemad, sest muld saab sügavamalt läbi külmuda.

Vaadates talviste kuude keskmisi väärtusi kõigi aastate jooksul olid väikseimad CO₂-vood jaanuaris. Sarnane tulemus saadi varasemas uurimuses samal uurimisalal 2013/14 aastatel (Soosaar *et al.*, 2014). Kuid siis oli CO₂-voog jaanuaris ligi poole väiksem (35,9 mg m⁻² h⁻¹) kui siin uurimuses (70,4 mg m⁻² h⁻¹). Seda võib põhjendada erineva mõõteperioodiga – varasemas uurimuses oli tegu ühe talve keskmise väärtusega, siin töös aga seitsme aasta keskmisega. Uri *et al.* (2019) uurimuses oli minimaalne talvine CO₂-voog noores männikus samuti jaanuaris. Sama toodi välja kõdusoometsades tehtud uurimuses, et väikseimad emissioonid olid jaanuaris ja veebruaris (Maanso, 2015). Põhjus, miks CO₂-vood on enamasti madalaimad jaanuaris tuleneb eelkõige temperatuurist. Siinses töös oli 2013–2019 aastate keskmised õhutemperatuurid madalaimad jaanuaris. Siin töös oli suvine maksimaalne CO₂-voog juulis, sarnaseid tulemusi on saanud ka teised Eestis okasmetsades tehtud uurimused (Soosaar *et al.*, 2014; Kriiska *et al.*, 2019).

Süsiniku netobilanss on tavaliselt negatiivne suvel, kui ökosüsteem süsiniku talletab, sidudes rohkem süsinikku kui ta eraldab. Siin uuringus tuli ette olukordi, kus talvine CO₂-voog oli negatiivse väärtusega. Üldiselt talvisel ajal ei ole CO₂-voog negatiivne, sest taimed on puhkeolekus ja intensiivset fotosünteesi ei toimu. Samas mitu uuringut kinnitavad, et paljud igi- või talvehaljaste lehtedega taimed on võimelised säilitama oma fotosünteesilise aktiivsuse kogu talve vältel (Atanasiu, 1971; Lundell *et al.*, 2008; Åström *et al.*, 2015; Saarinen *et al.*, 2016). Seega ei pruugi negatiivne talvine CO₂-voog tingimata tähendada viga mõõtmistes.

Selle uurimuse tulemused on kohaspetsiifilised, mistõttu ei saa teha üldistusi suurema ala kohta, kuna metsa aluspinna ja atmosfääri vahelisi CO₂-vooge mõjutavad palju tegureid, nagu kliimaatilised iseärasused, geograafiline paiknemine, metsatüüp ja mulla viljakus. Keskkonnatingimuste muutused mõjutavad iga metsa süsinikubilanssi erinevalt, mis muudab iga metsaökosüsteemi unikaalseks (Sever *et al.*, 2019). Sellest hoolimata saab tulevikus võrrelda selles töös saadud tulemusi Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaama tulemustega, kui jätkata järjepidevate välitöödega, mõõtes nii CO₂ kui ka teiste KHG vooge. Sel viisil saab teha põhjalikumaid järeldusi CO₂-voo muutusest ajas.

Laiaulatuslike üldistuste tegemiseks on oluline teha sarnaseid uurimusi ka teistes männikutes ja metsatüüpides ning sõltuvalt töö eesmärgist kasutada sobivat meetodit. Soontaga metsaökosüsteemi CO₂ netobilansist saab terviklikuma ülevaate kui uuringusse kaasata EC

meetod, kuid selle töö fookus oli uurida metsa aluspinna ja atmosfääri vahelisi CO₂-vooge, mistõttu kasutati ainult kambrimeetodit. Õhutemperatuuri andmed on saadud Valga meteoroloogiajaamast, sest Soontaga uurimisjaamas puudus järjepidev aegrida õhu- ja mullatemperatuuri andmete kohta. Seetõttu ei ole CO₂-voogude ja õhutemperatuuri vahelise seose täpsus maksimaalne. Suurema täpsusastme saavutamiseks on edaspidi kasulik välitöödel mõõta mullatemperatuur ja lumikatte paksus uurimisalalt kambrite juurest. Samuti uurida seoseid ka teiste parameetritega, nagu mulla niiskus, et saada täpsem ja põhjalikum ülevaate talvise CO₂-voogu mõjutavatest teguritest.

Uurimisprobleemi edasisel käsitlemisel tuleb arvestada talvise aja piiritlemisega. Erinevates uurimustes on talvist aega käsitletud eri kriteeriumite ja meetodikate alusel. Näiteks siin töös hõlmas talvine aeg vahemikku oktoober/november kuni märts/aprill, kuid teistes talvise aja uuringutes on see vahemik olnud väga kõikuv (november–mai, detsembri algus–märtsi keskpaik, november–märts, detsember–aprill). See muudab keeruliseks tulemusi omavahel võrrelda.

Kokkuvõte

Hemiboreaalsed metsad on pikaajalised süsiniku sidujad, tasakaalustades seeläbi globaalset süsinikubilanssi. Samas on nendes metsades tehtud vähe talvist aega hõlmavaid uuringuid. CO₂ kontsentratsiooni suurenemine atmosfääris ja sellest tulenev kõrgem õhutemperatuur avaldavad mõju eelkõige põhjapoolsetel laiuskraadidel ja talvel. Lumikate kaitseb alustaimestikku ja mulda tugeva külmumise eest, aga selle kestus ja paksus on viimasel ajal vähenenud.

Uurimuse eesmärk oli hinnata metsa aluspinna ja atmosfääri vahelist talvist CO₂-voogu metsaökosüsteemis ning välja selgitada, mil määral mõjutavad seda õhutemperatuur ja lumikatte paksus. CO₂-vooge mõõdeti hemiboreaalse okasmetsa aluspinnalt Soontaga uurimisjaamas. Proovid koguti seitsme aasta jooksul (2013–2019) kahenädalase intervalliga, kasutades suletud staatilist pimekambrimeetodit. See meetod on laialdaselt kasutusel oma universaalsuse tõttu.

Tulemused näitasid selget CO₂ sesoonset käiku: metsa aluspinna ja atmosfääri vaheline CO₂-voog oli intensiivsem suvisel ajal ja nõrgem talvisel ajal. Uuritud ajavahemiku jooksul oli suurim CO₂-voog juulis, 645,9 mg m⁻² h⁻¹ ja väikseim jaanuaris, 12,1 mg m⁻² h⁻¹. Talvised CO₂-vood varieerusid vahemikus 12,1–261,1 mg m⁻² h⁻¹. Kõikide aastate talviste kuude keskmiste väärtuste põhjal olid väikseimad CO₂-vood jaanuaris, 70,4 mg m⁻² h⁻¹. Seitsme aasta keskmiste väärtuste põhjal moodustas talvine CO₂-voog 24% kogu voogudest, mis on sarnane varasemate uuringu tulemusega, kus on hinnatud talvise CO₂-voo osakaalu aastasest voost.

Esimene hüpotees leidis kinnitust: metsaökosüsteemis oli õhutemperatuuri ja metsa aluspinna CO₂-voo vahel statistiliselt usaldusväärne ja tugev positiivne seos (kuu keskmiste väärtustega $r = 0,63$; $p < 0,0001$). Kõrgema talvise õhutemperatuuri korral olid CO₂-vood suuremad ja selle langedes olid ka vood väiksemad. Ka lumikatte paksuse ja talvise CO₂-voo vahel oli statistiliselt usaldusväärne negatiivne seos (kuu keskmiste väärtustega $r = -0,48$; $p < 0,003$). See näitab, et paksema lumikattega olid CO₂-voo väärtused väiksemad. Teine hüpotees ei leidnud kinnitust: 2013–2019 aastate jooksul talvised CO₂-vood statistiliselt oluliselt ei erinenud, küll aga suurenes trend ajas.

Tulemustest saab järeldada, et talvine CO₂-voog moodustab olulise osa aastasest voost ning seda mõjutavad nii õhutemperatuur kui ka lumikatte paksus. Uurimisprobleemi edasisel käsitlemisel tuleb tähelepanu pöörata talvise aja piiritlemisele. Pikaajalise CO₂-voo trendi muutuse hindamiseks on oluline jätkata pidevate välitöödega, uurida CO₂-vooge ka teistes metsatüüpides ja vaadata seoseid ka mulla niiskusega.

Wintertime carbon dioxide fluxes on the example of Soontaga forest ecosystem

Margarita Oja

Summary

Mid-latitude forest ecosystems have the potential to influence the global carbon balance, as forest soils of these regions are a reservoir for long-term storage of carbon. Not enough research has been conducted on carbon dioxide (CO₂) fluxes in hemiboreal forest ecosystems during the winter period. Snow cover protects the vegetation and the soil from freezing, yet the number of days with snow cover in Estonia has decreased within the last 60 years.

The aim of this study was to examine the role of wintertime carbon dioxide (CO₂) fluxes through forest floor respiration. The correlation between CO₂ fluxes, air temperature, and snow coverage were investigated. The objectives were:

1. To find out how much (%) wintertime CO₂ fluxes form from the CO₂ annual budget?
2. How strongly is the wintertime CO₂ flux dependent by air temperature and snow cover depth?

The hypotheses were:

1. Wintertime CO₂ fluxes will increase due to warmer winter air temperatures.
2. In time (seven-year-period) wintertime CO₂ fluxes rise.

The CO₂ flux between the forest floor and atmosphere was monitored, using a static closed chamber method. Field studies were conducted in Soontaga research station (58°01'24"N, 26°04'15"E) located in a hemiboreal coniferous forest in Estonia. This research focuses on CO₂ fluxes between the years 2013–2019. Gas samples were collected with two weeks interval and subsequently analyzed in the laboratory. Wintertime was defined as a period outside of the growing season when the daily average air temperature was below +5 °C.

The research findings showed seasonal variability in the CO₂ flux, where the CO₂ flux between the forest floor and the atmosphere is more intense during the summer period and lower during winter. In this study wintertime, CO₂ fluxes formed approximately 24% from the annual budget. Throughout the study period, wintertime CO₂ flux varied, with monthly averages, from 12.1–261.1 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, lowest fluxes occurred in January. A significant positive correlation between CO₂ flux and air temperature was found ($r = 0.63$; $p < 0,0001$), which supports the first hypothesis. Whereas the second hypothesis was not supported: within the seven-year-period,

wintertime CO₂ fluxes have shown no significant rise, although revealing a slightly rising trend. A significant negative correlation was found between CO₂ flux and snow depth ($r = -0.48$; $p < 0,003$). This finding showed that with higher snow depth CO₂ fluxes are smaller.

The study concludes that even though the air- and soil temperatures are low, the soil might be frozen and may occur snow cover, wintertime CO₂ fluxes contribute significantly to the annual CO₂ budget and is influenced by air temperature and snow depth.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajat Kaido Soosaart põhjalikkuse, pühendumuse ja panustatud aja eest. Samuti tänan ka oma kaasjuhendajat Birgit Viru kasulike soovituste ja tähelepanelike nõuannete eest kogu töö jooksul. Soovin tänada ka eesti keele tekstiõpetuse lektorit Riina Reinsalu julgustava tagasiside ja keeleliste nõuannete eest.

Kasutatud kirjandus

- Ahti, T., Hämet-Ahti, L., Jaakko, J. (1968). Vegetation zones and their sections in northwestern Europe. *Annales Botanici Fennici*, 5(3), 169–211.
- Alm, J., Saarnio, S., Nykänen, H., Silvola, J., Martikainen, P.J. (1998). Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochemistry*, 44, 164–186.
- Aro, L. (2014). *Kahe erineva meetodi kasutamise C-bilansi määramiseks Lavassaare jääkturbaala näitel*. Magistritöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.
- Åström, H., Metsovuori, E., Saarinen, T., Lundell, R., Hänninen, H. (2015). Morphological characteristics and photosynthetic capacity of *Fragaria vesca* L. winter and summer leaves. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 215, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2015.07.001>
- Atanasiu, L. (1971). Photosynthesis and respiration of three mosses at winter low temperatures. *The Bryologist*, 74(1), 23–27.
- Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J. P. (2002). Annual CO₂ balance of a subarctic fen in northern Europe: Importance of the wintertime efflux. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(21), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2002JD002055>
- Bailey, D., Callery, S., Jackson, R., Shaftel, H. (2020). *Carbon dioxide, climate change: Vital signs of the planet*. Kasutatud 25.03.2020, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- Baldocchi, D.D., Hincks, B.B., Meyers, T.P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69(5), 1331–1340.
- Batjes, N.H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47(2), 151–163.
- Berner, R. A. (2003). The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426(6964), 323–326. <https://doi.org/10.1038/nature02131>
- Bradshaw, R. H. W., Edenius, L. (1998). The Fennoscandian perspective: grazing in boreal, hemiboreal and nemoral forest. J. Humphrey, R. Gill, J. Claridge (toim), *Grazing as a management tool in European forest ecosystems*. Edinburgh: Forestry Commission.

- Denmead, O.T. (2008). Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant Soil*, 309, 5–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9599-z>
- Drenkhan, R. (2004). Soontaga looduskaitseala kaitsekorralduskava aastateks 2006–2015. Tartu: Metsahoiu Sihtasutus.
- Eesti metsanduse arengukava aastani 2030 alusuuringu aruanne. (2018). Eesti Maaülikool, Tartu Ülikool. Tartu: Keskkonnaministeerium.
- Estilow, T. W., Young, A. H., Robinson, D. A. (2015). A long-term northern hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring. *Earth System Science Data*, 7, 137–142.
- FAO. (2010). Global forest resources assessment 2010. Rome: Food and agriculture organization of the united nations.
- FAO. (2018). The state of the world's forests 2018 - Forest pathways to sustainable development. Rome: Food and agriculture organization of the united nations.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O' sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., ... Zaehle, S. (2019). Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11, 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Global climate report for annual 2019*. (2020). NOAA National centers for environmental information, state of the climate. Kasutatud 26.03.2020, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>
- Groffman, P. M., Driscoll, C. T., Fahey, T. J., Hardy, J. P., Fitzhugh, R. D., Tierney, G. L. (2001). Colder soils in a warmer world: A snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. *Biogeochemistry*, 56(2), 135–150. <https://doi.org/10.1023/A:1013039830323>
- Haei, M., Öquist, Mats, G., Kreyling, J., Ilstedt, U., Laudon, H. (2013). Winter climate controls soil carbon dynamics during summer in boreal forests. *Environmental Research Letters*, 8, 24017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024017>
- Hutchinson, G. L., Livingston, G. P. (1993). Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*, 55, 63–78. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub55.c4>

- Huth, V., Jurasinski, G., Glatzel, S. (2012). Winter emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from a minerotrophic fen under nature conservation management in north-east Germany. *Mires and Peat*, 10, 1–13.
- IPCC. (2014). Summary for policymakers. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth ... J.C. Minx (toim), *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). Framing and Context. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, ... T. Waterfield (toim), *Special report: Global warming of 1.5 °C*. Geneva: IPCC Secretariat.
- Kauer, K. (2014) *Mulla süsinikuvarude ja-voogude mudelprognosisid*.
- Kim, Y., Kodama, Y. (2012). Environmental factors regulating winter CO₂ flux in snow-covered boreal forest soil, interior Alaska. *Biogeosciences Discussions*, 9(1), 1129–1159. <https://doi.org/10.5194/bgd-9-1129-2012>
- Kim, Y., Ueyama, M., Nakagawa, F., Tsunogai, U., Harazono, Y., Tanaka, N. (2007). Assessment of winter fluxes of CO₂ and CH₄ in boreal forest soils of central Alaska estimated by the profile method and the chamber method: A diagnosis of methane emission and implications for the regional carbon budget. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 59(2), 223–233. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00233.x>
- Kirschbaum, M. U. F., Eamus, D., Gifford, R. M., Roxburgh, S. H., Sands, P. J. (2001). Definitions of some ecological terms commonly used in carbon accounting. NEE Workshop proceedings: 18–20 aprill 2001.
- Krasnova, A., Kukumägi, M., Mander, Ü., Torga, R., Krasnov, D., Noe, S. M., Soosaar, K. (2019b). Carbon exchange in a hemiboreal mixed forest in relation to tree species composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 275, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.007>
- Krasnova, A., Soosaar, K., Uri, V., Krasnov, D., Noe, S., Jaagus, J., Mander, Ü. (2019a). Eesti metsade süsinikubilanss 2018. aasta põua ja kuumalaine tingimustes. *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 113, 274–282.
- Kreyling, J. (2010). Winter climate change: a critical factor for temperate vegetation performance. *Ecology*, 91(7), 1939–1948. <https://doi.org/10.1890/09-1160.1>

- Kriiska, K., Frey, J., Asi, E., Kabral, N., Uri, V., Aosaar, J., Ostonen, I. (2019). Variation in annual carbon fluxes affecting the SOC pool in hemiboreal coniferous forests in Estonia. *Forest Ecology and Management*, 433, 419–430. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.026>
- Kukumägi, M., Ostonen, I., Uri, V., Helmisaari, H. S., Kanal, A., Kull, O., Lõhmus, K. (2017). Variation of soil respiration and its components in hemiboreal Norway spruce stands of different ages. *Plant and Soil*, 414(1–2), 265–280. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3133-5>
- Kunkel, K. E., Robinson, D. A., Champion, S., Yin, X., Estilow, T., Frankson, R. M. (2016). Trends and extremes in northern hemisphere snow characteristics. *Current Climate Change Reports*, 2, 65–73. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0036-8>
- Kuzyakov, Y. (2006). Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 425–448. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.020>
- Kuusik, K., Hirse, T. (2018). Keskkonnamõju analüüs soontaga mets.
- Lamlom, S. H., Savidge, R. A. (2003). A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 381–388. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3)
- Linderholm, H., W. (2006). Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.006>
- Lindsey, R. (2020). NOAA, climate change: atmospheric carbon dioxide. Kasutatud 29.02.2020, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Lohila, A., Aurela, M., Regina, K., Tuovinen, J. P., Laurila, T. (2007). Wintertime CO₂ exchange in a boreal agricultural peat soil. *Tellus Chemical and Physical Meteorology*, 59(5), 860–873. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00314.x>
- Lucas-Moffat, A. M., Huth, V., Augustin, J., Brümmer, C., Herbst, M., Kutsch, W. L. (2018). Towards pairing plot and field scale measurements in managed ecosystems: Using eddy covariance to cross-validate CO₂ fluxes modeled from manual chamber campaigns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256, 362–378. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.023>

- Luhamaa, A., Kallis, A., Mändla, K., Männik, A., Pedusaar, T., Rosin, K. (2014). Eesti tuleviku kliimastsenaariumid aastani 2100. Tallinn: Keskkonnaagentuur.
- Lundell, R., Saarinen, T., Åström, H., Hänninen, H. (2008). The boreal dwarf shrub *Vaccinium vitis-idaea* retains its capacity for photosynthesis through the winter. *Botany*, 86(5), 491–500. <https://doi.org/10.1139/B08-022>
- Luysaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A. D., Reichstein, M., Papale, D., Janssens, I. A. (2007). CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, 13(12), 2509–2537. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x>
- Lõhmus, K., Rosenvald, K., Ostonen, I., Kukumägi, M., Uri, V., Tullus, A., ... Sõber, A. (2019). Elevated atmospheric humidity shapes the carbon cycle of a silver birch forest ecosystem: A FAHM study. *Science of the Total Environment*, 661, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.160>
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., ... Stocker, T., F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453, 379–382. <https://doi.org/10.1038/nature06949>
- Maanso, H. (2015). *Kasvuhoonegaaside emissioon kõdusoometsadest*. Magistritöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.
- Malhi, Y., Baldocchi, D. D., Jarvis, P. G. (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, 22(6), 715–740. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00453.x>
- Malhi, Y., Meir, P., Brown, S. (2002). Forests, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1797), 1567–1591. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1020>
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J., Martikainen, P.J. (2003). Measuring N₂O emissions from organic soils by closed chamber or soil/snow N₂O gradient methods. *European Journal of Soil Science*, 54, 625–631.
- Mann, L. K. (1986). Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*, 142(5), 279–288. <https://doi.org/10.1097/00010694-198611000-00006>

- Merbold, L., Steinlin, C., Hagedorn, F. (2013). Winter greenhouse gas fluxes (CO₂, CH₄ and N₂O) from a subalpine grassland. *Biogeosciences*, 10(5), 3185–3203. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3185-2013>
- Metsaseadus. Vastu võetud 07.06.2006, RT I2006, 30, 232. Viimane redaktsioon RT I, 29.06.2018, 1.
- Morgner, E., Elberling, B., Strebel, D., Cooper, E. J. (2010). The importance of winter in annual ecosystem respiration in the High Arctic: effects of snow depth in two vegetation types. *Polar Research*, 29(1), 58–74. <https://doi.org/10.3402/polar.v29i1.6052>
- Noe, S. M., Kimmel, V., Hüve, K., Copolovici, L., Portillo-Estrada, M., Püttsepp, Ü., ... Wohlfahrt, G. (2011). Ecosystem-scale biosphere-atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvelja, Estonia. *Forest Ecology and Management*, 262(2), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.013>
- Nokkur, A. (2019). *Süsiniku sidumine ja varud erineva vanusega jänese kapsa kasvukohatüübi kuusikute (Picea abies [L.] Karst) maapealses biomassis*. Magistritöö. Eesti Maaülikool, metsandus- ja maaehitusinstituut.
- Ostonen, I., Helmisaari, H.-S., Borken, W., Tedersoo, L., Kukumägi, M., Bahram, M., ... Lõhmus, K. (2011). Fine root foraging strategies in Norway spruce forests across a European climate gradient. *Global Change Biology*, 17(12), 3620–3632. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02501.x>
- Ostonen, I., Rosenvald, K., Helmisaari, H.-S., Godbold, D., Parts, K., Uri, V., Lõhmus, K. (2013). Morphological plasticity of ectomycorrhizal short roots in *Betula* sp and *Picea abies* forests across climate and forest succession gradients: its role in changing environments. *Frontiers in Plant Science*, 4(335), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00335>
- Ostonen, I., Truu, M., Helmisaari, H.-S., Lukac, M., Borken, W., Vanguelova, E., ... Truu, J. (2017). Adaptive root foraging strategies along a boreal-temperate forest gradient. *New Phytologist*, 215(3), 977–991. <https://doi.org/10.1111/nph.14643>
- Penczykowski, R. M., Connolly, B. M., Barton, B. T. (2017). Winter is changing: Trophic interactions under altered snow regimes. *Food Webs*, 13, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2017.02.006>

- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Fang, J., Wang, X. (2010). Change in winter snow depth and its impacts on vegetation in China. *Global Change Biology*, 16(11), 3004–3013. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02210.x>
- Peterjohn, W. T., Melillo, J. M., Bowles, F. P., Steudler, P. A. (1993). Soil warming and trace gas fluxes: experimental design and preliminary flux results. *Oecologia*, 93(1), 18–24. <https://doi.org/10.1007/BF00321185>
- Pumpanen, J., Longdoz, B., Kutsch, W.L. (2010). Field measurements of soil respiration: principles and constraints, potentials and limitations of different methods. W. L. Kutsch, M. Bahn, A. Heinemeyer (toim), *Soil carbon dynamics: an integrated methodology*. New York: Cambridge University Press.
- Raich, J. W., Schlesinger, W. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2), 81–99. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x>
- Raudsaar, M., Sims, A., Timmusk, T., Pärt, E., Nikopensius, M., Matson, T. (2018). *Aastaraamat Mets*. Tallinn: Keskkonnaagentuur.
- Riigi Teataja. (2006). Soontaga looduskaitseala kaitse alla võtmine ja kaitse-eeskiri.
- Riigi Ilmateenistus*. (2018). Kasutatud 11.01.2020, <http://www.ilmateenistus.ee/definition/talv/>
- Rutledge, K., McDaniel, M., Boudreau, D., Ramroop, T., Teng, S., Sprout, E., ... Hunt, J. (2011). Ecosystem. *National Geographic*, 2.
- Saarinen, T., Rasmus, S., Lundell, R., Kauppinen, O.-K., Hänninen, H. (2016). Photosynthetic and phenological responses of dwarf shrubs to the depth and properties of snow. *Oikos*, 125(3), 364–373. <https://doi.org/10.1111/oik.02233>
- Savage, K. E., Davidson, E. A., Abramoff, R. Z., Finzi, A. C., Giasson, M. A. (2018). Partitioning soil respiration: quantifying the artifacts of the trenching method. *Biogeochemistry*, 140(1), 53–63. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0472-8>
- Sepp, T., Köster, K., Küngas, R. (2018). Kust sa tead, et kliima soojeneb? *Riigikogu Toimetised*, 38, 221–230.
- Sever, M. Z. O., Alberti, G., Delle Vedove, G., Marjanović, H. (2019). Temporal evolution of carbon stocks, fluxes and carbon balance in pedunculate oak chronosequence under

- close-to-nature forest management. *Forests*, 10(9), 814. <https://doi.org/10.3390/f10090814>
- Soosaar, K. (2010). *Greenhouse gas fluxes in rural landscapes of Estonia*. Doktoritöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.
- Soosaar, K., Mander, Ü., Lõhmus, K., Uri, V., Rannik, K., Ostonen, I., ... Teemusk, A. (2014). Ökosüsteemi süsinikdioksiidi bilanss, mullahingamine ja netoprimaarproduktioon Soontaga boreaalses männikus. *Publicationes instituti geographici universitatis tartuensis* 111, 352–360.
- Statistikaamet. (2019). Kasutatud 16.03.2020, <https://estat.stat.ee/StatistikaKaart/VKR>
- Stielstra, C. M., Lohse, K. A., Chorover, J., McIntosh, J. C., Barron-Gafford, G A., Perdrial, J. N., ... Brooks, P. D. (2015). Climatic and landscape influences on soil moisture are primary determinants of soil carbon fluxes in seasonally snow-covered forest ecosystems. *Biogeochemistry*, 123, 447–465. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0078-3>
- Zhang, Z., Zhang, R., Cescatti, A., Wohlfahrt, G., Buchmann, N., Zhu, J., Merbold, L. (2017). Effect of climate warming on the annual terrestrial net ecosystem CO₂ exchange globally in the boreal and temperate regions. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03386-5>
- Tooming, H., Kadaja, J. (2006). *Eesti lumikatte teatmik*. Tallinn-Saku: Eesti meteoroloogia ja hüdroloogia instituut, Eesti maaviljeluse instituut.
- Torga, R., Mander, Ü., Soosaar, K., Kupper, P., Tullus, A., Rosenvald, K., ... Lõhmus, K. (2017). Weather extremes and tree species shape soil greenhouse gas fluxes in an experimental fast-growing deciduous forest of air humidity manipulation. *Ecological Engineering*, 106, 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.025>
- Truu, M., Ostonen, I., Preem, J. K., Lõhmus, K., Nõlvak, H., Ligi, T., ... Truu, J. (2017). Elevated air humidity changes soil bacterial community structure in the silver birch stand. *Frontiers in Microbiology*, 8(557), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00557>
- Tullus, H., Drenkhan, R., Lutter, R., Hanso, M. (2015). Metsandus. BioClim kliimamuutuste mõjuanalüüs, kohanemisstrateegia ja rakenduskava looduskeskkonna ja biomajanduse teemavaldkonnades. Tartu.

- United Nations. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. New York: United Nations.
- Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Ligi, K., Padari A., ... Lõhmus, K. (2014). The dynamics of biomass production, carbon and nitrogen accumulation in grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) chronosequence stands in Estonia. *Forest Ecology and Management*, 327, 106–117.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Aun, K., Soosaar, K. (2019). The carbon balance of a six-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem estimated by different methods. *Forest Ecology and Management*, 433, 248–262. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.012>
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Soosaar, K., ... Karoles, K. (2017). Carbon budgets in fertile grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands of different ages. *Forest Ecology and Management*, 396, 55–67.
- Wang, K., Liu, C., Zheng, X., Pihlatie, M., Li, B., Haapanala, S., ... Hu, F. (2013). Comparison between eddy covariance and automatic chamber techniques for measuring net ecosystem exchange of carbon dioxide in cotton and wheat fields. *Biogeosciences* 10, 6865–6877. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6865-2013>
- Varik, M. (2014). *Carbon fluxes and storages in a chronosequence of silver birch stands*. Doktoritöö. Eesti Maaülikool, metsanduse eriala.
- Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V. (2013). Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. *Forest Ecology and Management*, 302, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.033>
- Varik, M., Kukumägi, M., Aosaar, J., Becker, H., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V. (2015). Carbon budgets in fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) chronosequence stands. *Ecological Engineering*, 77, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.041>
- Waring, R. H., Running, S. W. (2007). *Forest ecosystems, analysis at multiple scales*. Burlington: Elsevier Academic Press.
- Verburg, P. S. J., Larsen, J., Johnson, D. W., Schorran, D. E., Arnone, J. A. (2005). Impacts of an anomalously warm year on soil CO₂ efflux in experimentally manipulated tallgrass

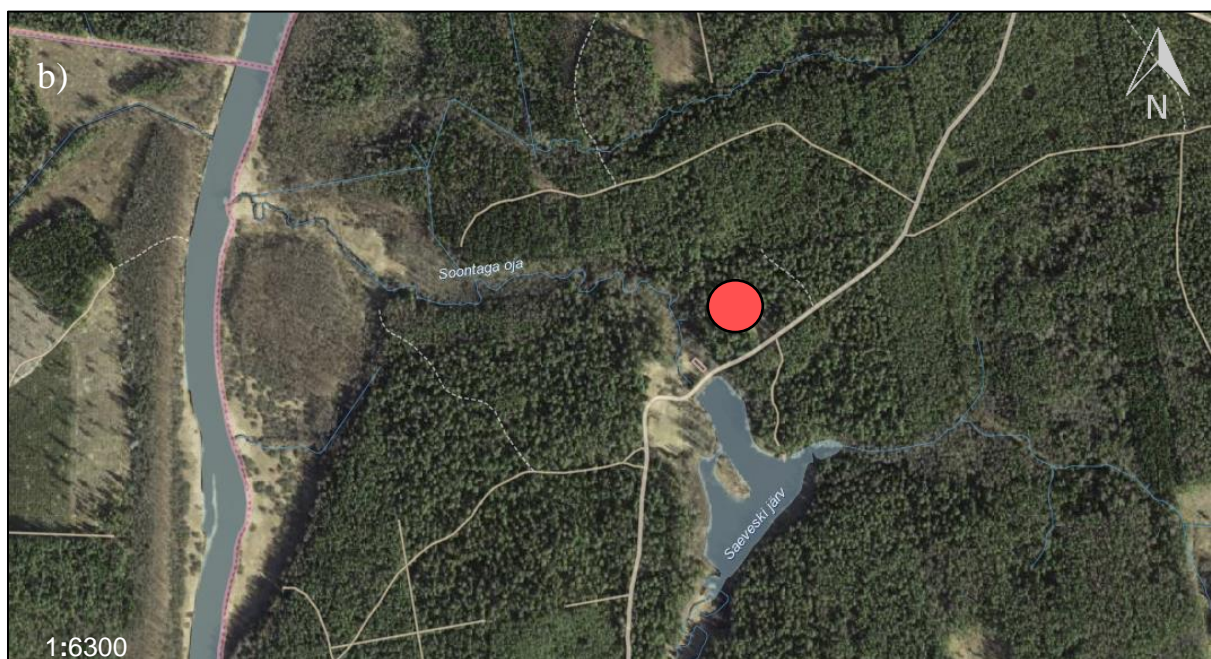
prairie ecosystems. *Global Change Biology*, 11(10), 1720–1732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001032.x>

Viru, B. (2016). *Pikaajalised muutused lumikatterežiimis Eestis perioodil 1951–2015*. Magistritöö. Tartu Ülikool, geograafia osakond.

Viru, B., Jaagus, J. (2020). Spatio-temporal variability and seasonal dynamics of snow cover regime in Estonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 759–771. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03013-5>

Lisa 1.

Uurimisala asukoht. a) kambrite paiknemine uurimisalal; b) Soontaga uurimisala ümbritsevad alad; c) Soontaga paiknemine Eesti suhtes. (Aluskaart, Maa-amet 2020)

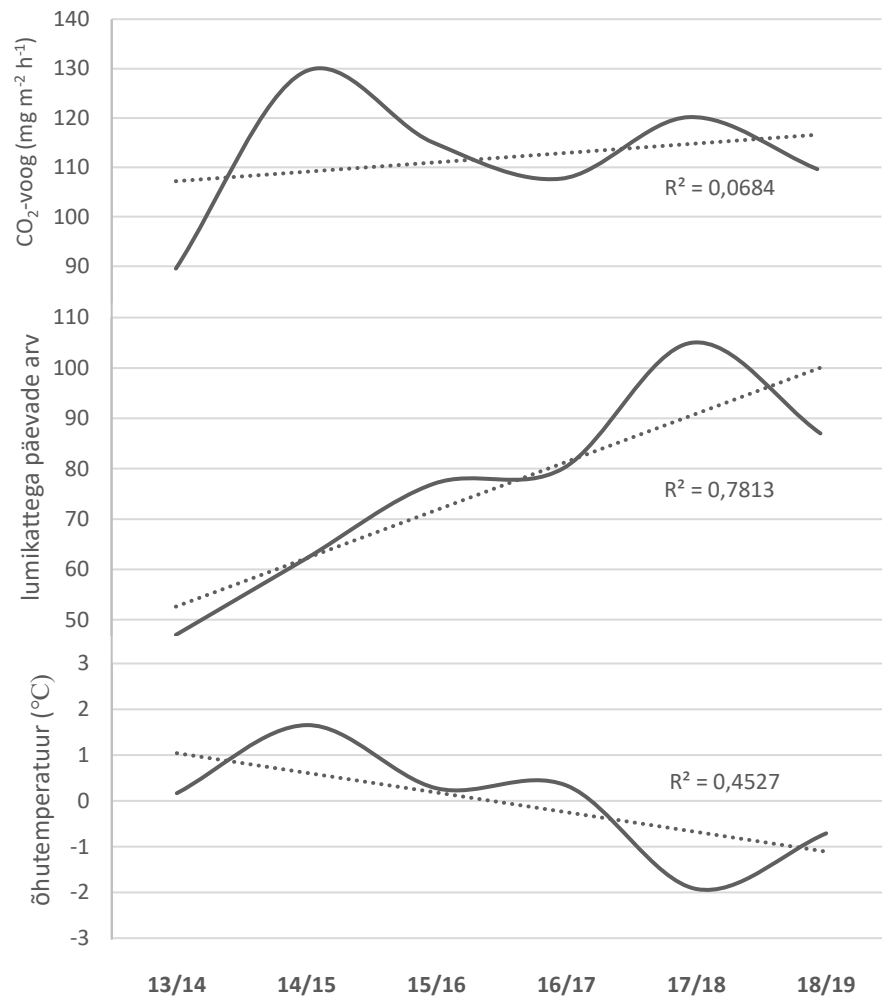


Lisa 1... *jätk.*



Lisa 2.

CO₂-voo, lumikattega päevade arvu ja õhutamperatuuri muutused seitsme talve jooksul (2013/14–2018/19 hooaja talved).



Lisa 3.

Talvise CO₂-voo korrelatsioonimaatriks seose tugevuse (r*) väärtuste põhjal. Statistiliselt olulised korrelatsioonikordajad on märgitud paksus kirjas.

	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
2013/14	1	0,60	0,86	-0,15	-0,14	0,21
2014/15	0,60	1	0,98	0,83	0,69	0,16
2015/16	0,86	0,98	1	0,86	0,696	-0,07
2016/17	-0,15	0,83	0,86	1	0,60	0,40
2017/18	-0,14	0,69	0,696	0,60	1	-0,45
2018/19	0,21	0,16	-0,07	0,40	-0,45	1

* $r \leq 0,3$ – nõrk seos; $0,3 < r < 0,7$ – keskmine seos; $r \geq 0,7$ – tugev seos.

Lisa 4.

Varasemad CO₂-vooge käsitlevad uuringud Eesti metsaökosüsteemides.

Pealkiri ja autor	Metsatüüp/puuliigid	Kasutatud meetod	Tulemus
"Variation in annual carbon fluxes affecting the SOC pool in hemiboreal coniferous forests in Estonia" (Kriiska et al., 2019)	harilik mänd, harilik kuusk	suletud dünaamiline kambrimeetod (trenching meetod) R _h mõõtmised: aprill–dets 2015	NEP: -1,8 – 4,2 Mg C ha ⁻¹ a ⁻¹ R _s (mänd) 5,7 ± 0,3 Mg C ha ⁻¹ a ⁻¹ R _s (kuusk) 6,5 ± 0,3 Mg C ha ⁻¹ a ⁻¹
"The carbon balance of a six-year-old Scots pine (Pinus sylvestris L.) ecosystem estimated by different methods" (Uri et al., 2019)	harilik mänd	EC + suletud dünaamiline kambrimeetod EC mõõtmised: aprill 2016–aprill 2017 R _s ja R _h mõõtmised: aprill–dets 2016	süsiniku siduja NEE: 1,19 ± 0,36 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ GPP: 9,87 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ RE: 11,06 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ NEP: 1,37 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ R _s : 6,0 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ R _h : 4,2 t C ha ⁻¹ a ⁻¹
"Carbon exchange in a hemiboreal mixed forest in relation to tree species composition" (Krasnova et al., 2019b)	segamets (45% harilik kuusk, 40% kask) okasmets (80% kuusk, 15% kask)	EC + suletud dünaamiline kambrimeetod mõõtmised: mai–okt 2014, mai–okt 2015	süsiniku siduja NEE: -585,62 ± 45,16 g C m ⁻² a ⁻¹ GPP: -1280,62 ± 53,36 g C m ⁻² a ⁻¹ RE: 696,00 ± 98,51 g C m ⁻² a ⁻¹ NEP: 6,3 t C ha ⁻¹ a ⁻¹
"Carbon budgets in fertile silver birch (Betula pendula Roth) chronosequence stands" (Varik et al., 2015)	13-, 32- ja 45 aastased arukaasikud	suletud dünaamiline kambrimeetod mõõtmised: juuni–nov 2010, mai–nov 2011	süsiniku siduja NEP: 3,7–4,9 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ NEP väärtused madalaimad 32.a ja kõrgeimad 45.aastases arukaasikus
„Süsiniku vood ning varud erivanuselistes arukaasikutes“ (doktoritöö) (Varik, 2014)	jänese kapsa kasvukohatüübi arukaasikud	suletud dünaamiline kambrimeetod (trenching meetod) mõõtmised: juuli–nov 2010, mai–nov 2011	süsiniku sidujad NEP: 3,7–4,9 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ R _h : 2,9–4,2 t C ha ⁻¹ a ⁻¹ süsinik akumulatsioon valdavalt puude biomassis
„Eesti metsade süsinikubilanss 2018. aasta põua ja kuumalaine tingimustes“ (Krasnova et al., 2019a)	lehtmets (lepik) okasmets (männik ja kuusik) segamets (mänd, kuusk, kask) arukase-raiesmik	EC meetod mõõtmised: jaanuar 2017–dets 2018	NEE (okasmets): -178 g C m ⁻² s ⁻¹ NEE (lehtmets): -722 g C m ⁻² s ⁻¹ NEE (segamets): 565 g C m ⁻² s ⁻¹ NEE (raiesmik): 202 g C m ⁻² s ⁻¹
„Süsiniku sidumine ja varud erineva vanusega jänese kapsa kasvukohatüübi kuusikute (Picea abies [L.] Karst) maapealses biomassis“ (magistritöö) (Nokkur, 2019)	erineva vanusega jänese kapsa kasvukohatüübi kuusikud	muldpuude meetod mõõtmised: sügis 2018	Suurimad puudesse seotud C varud oli 62–80 aastastes kuusikutes 125–204 t C ha ⁻¹ Keskmise aastane C sidumine puude maapealsesse biomassi on kõrgeim keskealistes puistutes 5,3–6,2 t C ha ⁻¹ a ⁻¹

<p>„Kasvuhoonegaaside emissioon kodusoometsadest“ (magistritöö)</p> <p>(Maanso, 2015)</p>	<p>erineva kuivendusrežiimiga kodusoometsad</p> <p>harilik mänd, harilik kuusk, sookask</p>	<p>staatiline pimekambrimeetod</p> <p>mõõtmised: aprill 2014–märts 2015</p>	<p>Keskmine aasta hingamine: männikutes $72,4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kuusikutes $80,8 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kaasikutes $99,7 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$</p> <p>Keskmine süsihappegaasi voog $0,84\text{--}264,7 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$</p>
<p>"<i>Ecosystem-scale biosphere-atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvelja, Estonia</i>"</p> <p>(Noe <i>et al.</i>, 2011)</p>	<p>harilik kuusk, arukask, sanglepp</p>	<p>EC meetod + suletud dünaamiline kambrimeetod</p> <p>mõõtmised: august 2018, september 2019</p>	<p>NEE (<i>overstory</i>): $-4.59 \pm 1.01 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ NEE (<i>understory</i>): $3.60 \pm 0.23 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$</p> <p>$R_s$: $3,54 \pm 0,62 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$</p>
<p>„Ökosüsteemi süsinikdioksiidi bilanss, mullahingamine ja netoprimaarproduktioon Soontaga boreaalses männikus“</p> <p>(Soosaar <i>et al.</i>, 2014)</p>	<p>harilik mänd, harilik kuusk</p>	<p>EC meetod + suletud staatiline kambrimeetod</p> <p>mõõtmised: august 2013–sept 2014</p>	<p>süsiniku siduja</p> <p>NEE: $19,1 \text{ mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ R_s: $36\text{--}562,5 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$</p>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Margarita Oja,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Talvised süsihappegaasi vood Soontaga metsaökosüsteemi näitel“, mille juhendajad on Kaido Soosaar ja Birgit Viru reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Margarita Oja
24.05.2020